



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ANALÝZA LOMOVÉHO PORUŠENÍ NÁSTROJOVÝCH  
OCELÍ A STUDIUM JEHO ELIMINACE**

ANALYSIS OF TOOL STEEL CRACKING AND A STUDY OF ITS ELIMINATION

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Viktor Tomešek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**

**BRNO 2018**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Viktor Tomešek**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Analýza lomového porušení nástrojových ocelí a studium jeho eliminace**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Zjistit příčiny předčasného porušování částí nástrojů ve výrobním provozu, studium možností eliminace tohoto jevu.

### **Cíle diplomové práce:**

1. Teoretický rozbor problému
2. Návrhy řešení
3. Experimentální ověření
4. Rozbor výsledků

### **Seznam doporučené literatury:**

JECH, J. Tepelné zpracování ocelí: metalografická příručka. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 516 s. ISBN 80-7204-193-2.

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001. 360 s. ISBN 80-7204-130-4.

DAVIM, J. Paulo. Surface Integrity in Machining. Dostupné z:

<http://api.ning.com/files/A2GPx1yIYzQeNntSM8rkoz7WbINeXT1QGaeZ1fpBclt9zHRHZHaj8w2N4MNDsGmaon1ARBFmbm-UQXRyeeSbuKVkLM6SBQwU/SurfaceIntegrityinMachining.pdf>. [vid. 25.10.2016].

MANNLING, H.-D., PATIL, D.S., MOTO, K., JILEK, M., VEPREK, S. Thermal stability of superhard nanocomposite coatings consisting of immiscible nitrides, Surface and Coatings Technology. 2001, vol. 146-147. pp. 263-267. ISSN:0257-8972.

KLOCKE, F. et a. Improved Cutting Processes with Adapted Coating Systems. Annals of the CIRP. 1998, 47(1), pp. 65-71.

FREMUNT, P., KREJČÍK, J., PODRÁBSKÝ, T. Nástrojové oceli (odborná kniha). Dům techniky Brno, 1994. 230 s.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je popsat příčiny a mechanismy degračních procesů, které působí na povrch nástrojů vyrobených z nástrojové oceli, a navrhnout a ověřit praktické řešení, jež by vedlo k vyšší odolnosti nástrojů vůči těmto procesům. Kapitoly v teoretické části pojednávají o lomovém chování materiálu a možnostech jeho eliminace, experimentální část zahrnuje testování vlivu povlakování na trvanlivost nástrojů určených k tváření za tepla.

### Klíčová slova

nástrojová ocel, tváření za tepla, lomové porušení, tepelná únava, povlakování

## ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to describe the causes and mechanisms of degradation processes that affect the surface of tools made of tool steel and to design and verify a practical solution that would lead to higher resistance of tools to these processes. Chapters in the theoretical part deal with fracture behavior of the material and the possibilities of its elimination, the experimental part includes testing of the effect of coating on the durability of hot forming tools.

### Key words

tool steel, hot forming, failure, thermal fatigue, coating

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOMEŠEK, Viktor. *Analýza lomového porušení nástrojových ocelí a studium jeho eliminace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 51 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Analýza lomového porušení nástrojových ocelí a studium jeho eliminace** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Viktor Tomešek

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. a panu Ing. Josefu Kuželovi za trpělivost, ochotu, cenné připomínky a rady při vypracování práce. Poděkování patří také kolektivu Ústavu strojírenské technologie FSI VUT v Brně za pomoc při řešení experimentální části práce.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 PŘÍČINY A MECHANISMY LOMOVÉHO PORUŠENÍ NÁSTROJOVÝCH OCELÍ.....	10
1.1 Nástrojové oceli .....	10
1.2 Tepelná únava .....	10
1.3 Oxidace .....	14
1.4 Mechanické opotřebení .....	15
1.4.1 Abrazivní opotřebení .....	16
1.4.2 Adhezivní opotřebení.....	16
1.4.3 Kontaktní únava.....	17
2 LOMOVÉ CHOVÁNÍ MATERIÁLU .....	19
2.1 Lom materiálu .....	19
2.2 Zkoušky odolnosti materiálu proti křehkému porušení .....	20
2.2.1 Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho .....	20
2.2.2 Lomová mechanika.....	22
3 MOŽNOSTI ELIMINACE LOMOVÉHO PORUŠENÍ NÁSTROJŮ PŘI TVÁŘENÍ ZA TEPLA.....	27
3.1 Volba vhodného materiálu a tepelného zpracování .....	27
3.2 Aplikace povrchových úprav .....	29
3.2.1 CVD povlakování .....	29
3.2.2 PVD povlakování.....	30
3.3 Chlazení a předehřev nástrojů.....	31
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	33
4.1 Výchozí stav.....	33
4.2 Materiál nástroje.....	34
4.3 Metoda řešení problému.....	35
4.4 Charakteristiky jednotlivých povlaků .....	35
4.5 Příprava nástrojů před povlakováním .....	36
4.6 Testování povlakovaných nástrojů.....	37
4.6.1 Struktura povrchu povlaků.....	37
4.6.2 Trvanlivost povlakovaných nástrojů.....	39

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List	8
---------	-----------------	------	---

4.6.3	Ekonomická výhodnost.....	42
5	DISKUZE .....	44
5.1	Metody odpovlakování.....	44
	ZÁVĚR .....	46
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	47
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	50



## ÚVOD

V oblasti strojírenské výroby je nezbytným předpokladem pro schopnost obstát mezi konkurencí kladení důrazu na ekonomiku dané výroby. Proto je snahou volit takové výrobní technologie, stroje a nástroje, které při zachování požadované jakosti vyráběných součástí povedou ke snižování výrobních nákladů. Jedním z důležitých činitelů, které ekonomiku ve strojírenství značně ovlivňují, jsou náklady spojené s výrobou, úpravou a výměnou nástrojů. Vhodnost nástroje pro konkrétní aplikaci je možné hodnotit podle doby (případně počtu pracovních cyklů), po kterou je schopný pracovat tak, aby měl výrobek požadovaný tvar, rozměry a kvalitu povrchu. Tato doba (nebo počet cyklů) se nazývá trvanlivost nástroje [1].

Na trvanlivost nástroje má vliv jeho materiál, tepelné zpracování, geometrie, materiál vyráběné součásti, velikost sil působících na nástroj a vnější podmínky, jako jsou teplota a vlhkost. Jednou z možností, které zlepšují odolnost nástroje proti opotřebení, je metoda povlakování. Jedná se o nanášení tvrdého ochranného povlaku s vysokou ořezuvzdorností na povrch nástroje, přičemž metoda nachází uplatnění v oblastech obráběcích i tvářecích nástrojů. Povlakováním však vzrostou finanční náklady na nástroj, a je proto nutné posoudit jeho ekonomickou výhodnost.

## **1 PŘÍČINY A MECHANISMY LOMOVÉHO PORUŠENÍ NÁSTROJOVÝCH OCELÍ**

Negativním jevem při procesech obrábění a tváření ocelí je degradace povrchu nástrojů. Tato kapitola pojednává o porušení nástrojů vyrobených z nástrojové oceli, které podléhají kombinovanému tepelně-mechanickému namáhání. Mezi mechanismy opotřebení patří tepelná únava, jež vzniká v důsledku cyklických změn teploty v průběhu pracovního procesu, dále mechanické opotřebení při styku nástroje s opracovávanou součástí a oxidace. Vznik uvedených jevů probíhá na povrchu, a proto je důležité se zaměřit na povrchovou vrstvu o tloušťce v řádu milimetrů, která je vlivům degradace vystavena nejvíce. Snahou je těmto mechanismům v jejich vzniku a šíření pokud možno co nejvíce zabránit, protože časté přebušování a výměny nástrojů snižují produktivitu výroby [2].

### **1.1 Nástrojové oceli**

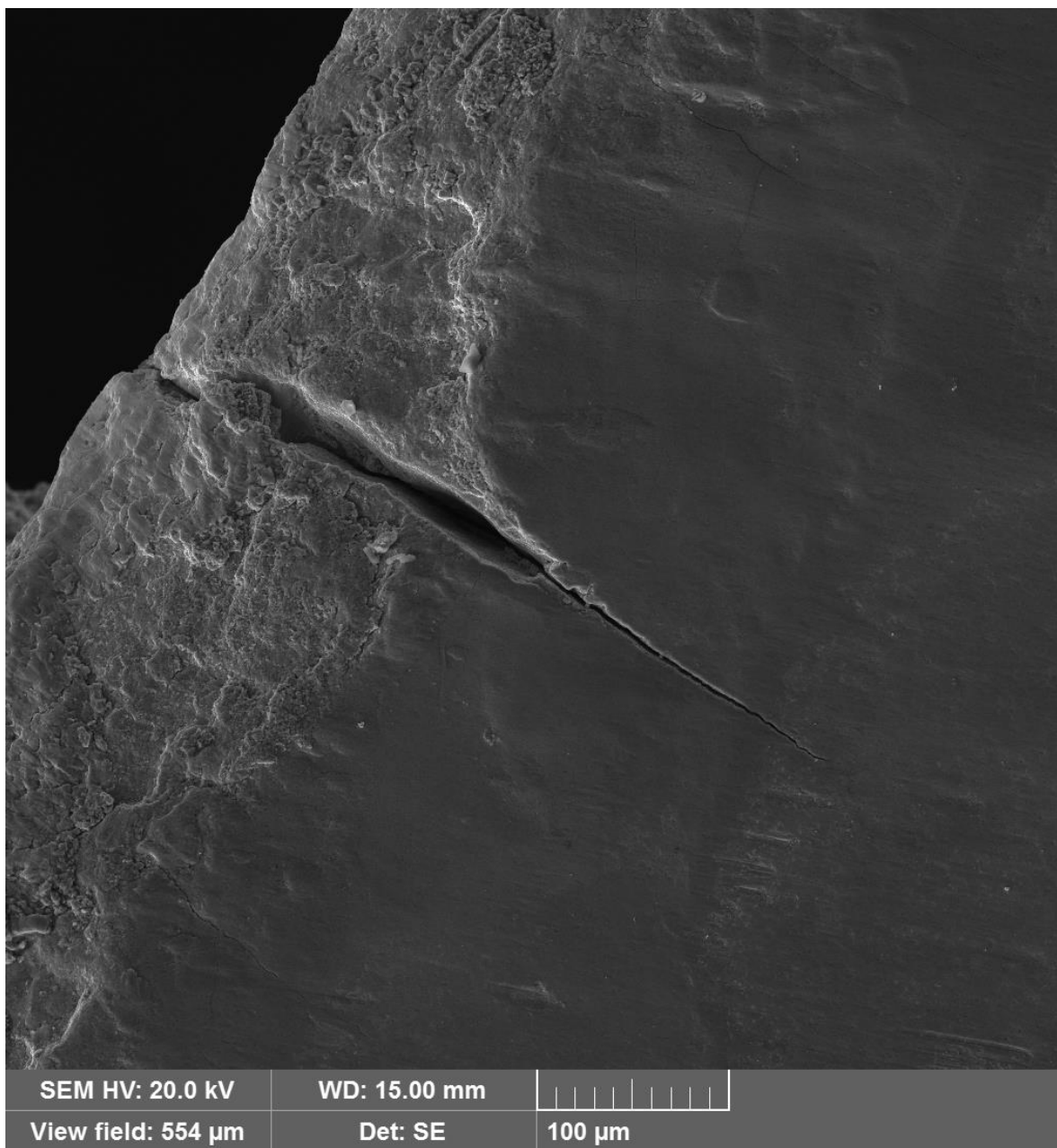
Nástrojové oceli zaujímají dominantní postavení mezi materiály používanými pro výrobu jak obráběcích, tak i tvářecích nástrojů. Důležité zastoupení mají kromě strojírenství i v dalších odvětvích průmyslu. V normách ČSN jsou obsaženy ve třídě 19, avšak pro výrobu nástrojů se často používají i slinuté karbidy nebo oceli zařazené do jiných tříd, např. oceli konstrukční. Nástrojové oceli musí zaručit nejen předepsané mechanické vlastnosti (minimální mez kluzu  $R_e$ , pevnost v tahu  $R_m$ , tvrdost), ale také některé specifické vlastnosti, např. prokalitelnost, řezivost, teplotní stálost (odolnost proti popouštění) a rozměrovou stálost (odolnost proti opotřebení). Nároky kladené na nástrojové oceli jsou proto velké a mnohdy protichůdné. Někdy se požaduje, aby nástroje měly vysokou tvrdost a pevnost, u jiných se naopak tyto vlastnosti snižují za účelem dosažení vyšší houževnatosti. Obecně se u všech nástrojů očekává značná odolnost proti abrazivnímu a adhezivnímu opotřebení, u nástrojů pracujících za tepla se musí samozřejmě mechanické vlastnosti zachovávat i za zvýšených teplot. Co se chemického složení týče, nástrojové oceli by měly mít vysokou čistotu (nízký podíl nežádoucích přímísených částic a rovnoměrně rozložené karbidy v matici) [3].

### **1.2 Tepelná únava**

Jak již bylo zmíněno výše, tepelná únava materiálu je způsobena velkými rozdíly teplotních gradientů při práci za tepla, což má za následek střídání tahového a tlakového namáhání. Při tepelném působení se povrchová vrstva nástroje roztahuje, ale vrstvy pod povrchem zůstávají studené a tomuto roztažení brání. Tím vzniká na povrchu tlakové pnu-

tí. Mezi velikostí tohoto pnutí a rozdílem teplot spolu s hodnotou koeficientu tepelné roztažnosti existuje přímá úměra. Při ochlazování se pnutí mění v tahové a vzniká napětí, které pokud je větší než mez kluzu materiálu, zapříčiňuje plastickou deformaci. Tím sice dochází ke snížení pnutí, ale současně také k nežádoucí změně rozměrů nástroje. Mechanická a tepelná pnutí iniciují tvorbu mikrotrhlin, které postupně rostou, šíří se ve směru kolmém na povrch, a nakonec vedou až k prasknutí nástroje. Výsledky zkoušek tepelné únavy ukazují, že zvýšení tvrdosti oceli vede k nižší rychlosti růstu únavových trhlin [3, 4].

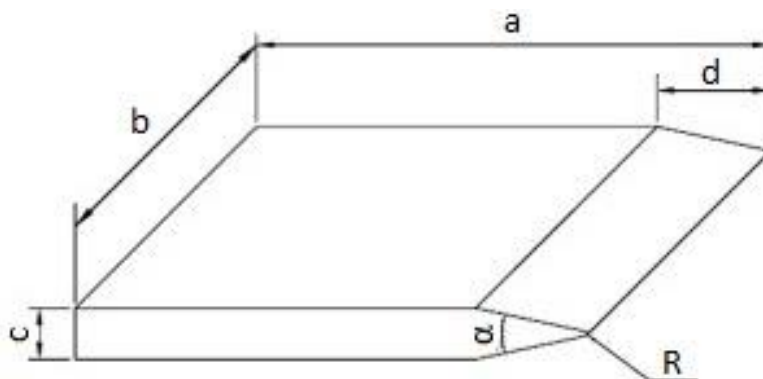
Snímek z elektronového mikroskopu zachycující trhlínu způsobenou tepelnou únavou je na obr. 1.



Obr. 1 Trhlina způsobená tepelnou únavou.

Zkoušky tepelné únavy se provádějí např. na klínovém vzorku s hranou o určitém poloměru (viz obr. 2). Tato hrana je střídavě zahřívána a chlazená v žáruvzdorné peci, a tím jsou do vzorku vnášena mechanická napětí. Ohřev zajišťuje např. několik žárovek. Záření těchto žárovek je vhodně zaostřeno tak, aby dopadalo na malé plochy o průměru několika mm. Chlazení je realizováno pomocí odnímatelné trysky, která se během cyklu pohybuje a vypouští studený vzduch. Hranu vzorku je nutno udržovat ve středu pece na nastavitelném držáku, který do vzorku nebude vnášet dodatečné mechanické zatížení. Dále

se definují teploty, při kterých bude tepelný cyklus probíhat, a také doba ohřevu a ochlazování. Testování je pravidelně přerušováno a vzorek je zkoumán pod optickým nebo elektronovým mikroskopem, čímž se zjišťují lokality vzniku a šíření trhlin [4].

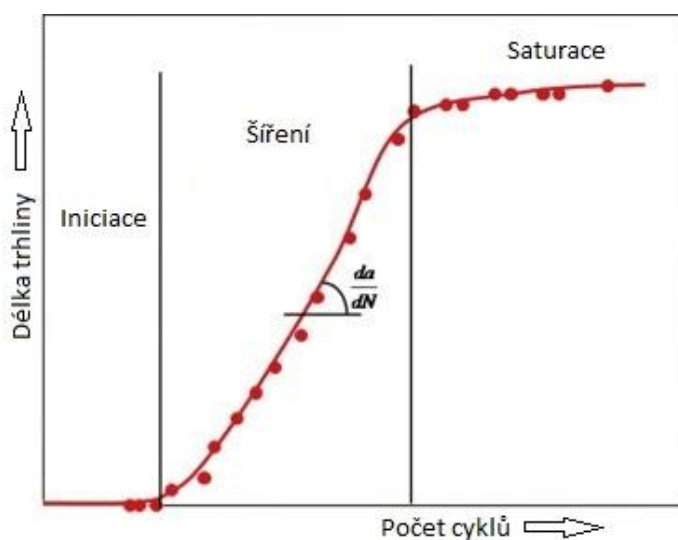


Obr. 2 Zkušební vzorek při testování tepelné únavy [4].

Vývoj délky trhliny lze definovat jako funkci počtu cyklů a probíhá ve třech fázích:

1. iniciace (zahájení),
2. šíření,
3. saturace (nasycení).

Typická závislost vývoje trhliny na počtu cyklů získaná z testování tepelné únavy je znázorněna na obr. 3 [4].



Obr. 3 Průběh vývoje trhliny [4].

Významný vliv na míru šíření únavových trhlin má tvrdost materiálu. Oceli se zvýšenou tvrdostí po tepelném zpracování jsou oproti ocelím s původní tvrdostí (před tepel-

ným zpracováním) odolnější vůči plastické deformaci. Ta je hnací silou šíření trhlin, a proto je u tvrdších materiálů pozorována také nižší rychlost šíření únavových trhlin. Naproti tomu nemá tepelné zpracování významný vliv na trvání první fáze vývoje trhliny. Jinými slovy, pro detekování první trhliny je u oceli v základním stavu i u stejné oceli tepelně zpracované potřeba provést zhruba stejný počet pracovních cyklů [4].

Odolnost proti tepelné únavě lze do určité míry hodnotit také z tahové zkoušky. Pokud při ní zúžení (kontrakce)  $Z$  vzorku klesne pod 25 %, má tento materiál zvýšený sklon k tepelné únavě [3].

Co se chemického složení oceli týče, jsou proti únavovým trhlinám odolné oceli legované vysokým obsahem chromu a s přísadou molybdenu, konkrétně např. ocel ČSN 19 554, protože si zachovává houževnatost i při vysoké pevnosti [3].

### 1.3 Oxidace

Dalším mechanismem opotřebení je oxidace. Dochází při ní k difuzi a k chemickým změnám během pracovního procesu. Oxidační opotřebení je tím větší, čím vyšší teplota na nástroj působí, a např. při válcování se objevuje při teplotách nad 250 °C. Oxidy se v oceli šíří z povrchu, jenž je vystaven okolní oxidační atmosféře, do hloubky podél hranic zrn matrice s karbidy. Tato dráha je způsobena zvýšenou difuzivitou uvedených hranic. Na oxidaci oceli má velký vliv přítomnost vody a vodních par, což výrazně zvyšuje rychlost oxidace a podporuje přeměnu materiálu v oxidy [2].

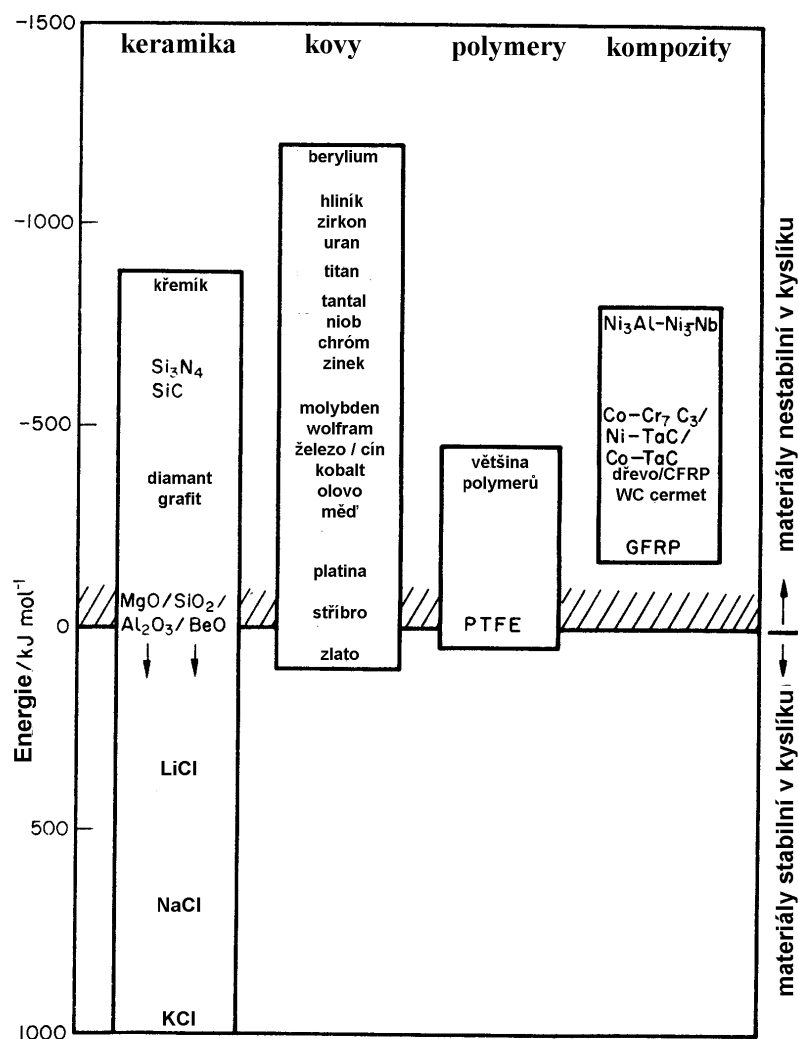
Důsledky oxidace lze interpretovat dvojím způsobem. První dopad je negativní – křehké a tvrdé oxidy na povrchu nástroje umožňují tvorbu a šíření trhlin do základního materiálu. Oxidace se ovšem v případě potřeby provádí i záměrně – druhý, pozitivní dopad totiž spočívá ve zlepšení třecích vlastností povrchu a snížení mechanického opotřebení [2].

Při hodnocení náchylnosti materiálu k oxidaci se v laboratorních podmínkách měří energie potřebná k reakci [5]:



Pokud je tato energie kladná, je materiál stabilní a proti oxidaci odolný. V případě, že je záporná, má daný materiál sklony k samovolné oxidaci. Na obr. 4 je sloupcový diagram, který znázorňuje tuto energii u čtyř druhů materiálů – keramika, kovy, polymery a kompozity. Jediný kov odolný vůči korozi při všech teplotách je zlato, a proto je také

jediným kovem nacházejícím se v přírodě v ryzí, nezoxidované formě. Ostatní kovy při kontaktu se vzduchem oxidují. K zabránění oxidace kovů se v praxi používá vhodná úprava povrchu – např. sulfátování a nitridace. Naopak sloučeniny kyslíku, jako jsou oxidy, silikáty nebo hlinitany, jsou stabilní a jejich uplatnění spočívá v keramických povlácích, které zabraňují oxidaci kovů – zpravidla jde o povlaky  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  nebo  $\text{BeO}$  [5].



Obr. 4 Energie potřebná k oxidaci různých materiálů [5].

#### 1.4 Mechanické opotřebení

K opotřebení nástroje dochází při vzájemném kontaktu funkčních ploch nástroje s opracovávanou součástí. Dochází k přemísťování nebo odstraňování částic hmoty, což vede k úbytku materiálu a zhoršení kvality povrchu součásti. Konkrétními projevy opotře-

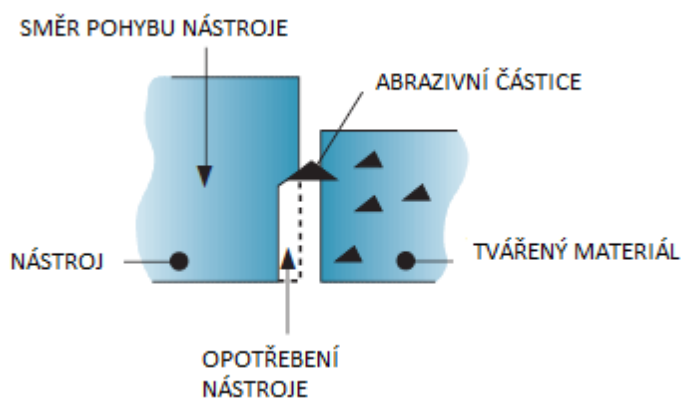
bení jsou např. lomové porušení, zadírání a rýhování. Tyto projevy patří mezi základní druhy opotřebení podle ČSN 01 5050 [6]:

- abrazivní;
- adhezivní;
- únavové;
- erozivní;
- kavitační.

Vzhledem k zaměření této práce na porušení nástrojových ocelí nebudou dále rozebrána opotřebení erozivní a kavitační, která jsou způsobena prouděním tekutin.

#### 1.4.1 Abrazivní opotřebení

Abraze je brusný ořez při kontaktu dvou těles, které se vůči sobě pohybují. Princip je schematicky vysvětlen na obr. 5. K opotřebení nástroje dochází stíráním vrstvy povrchu nástroje tvrdými částicemi tvářeného materiálu ve směru třecích sil. Těmito abrazivními částicemi mohou být vměstky obsažené v tvářeném materiálu nebo nečistoty z okolního prostředí. Působí jako klín mezi zrna a mohou způsobovat trhliny [2, 6].



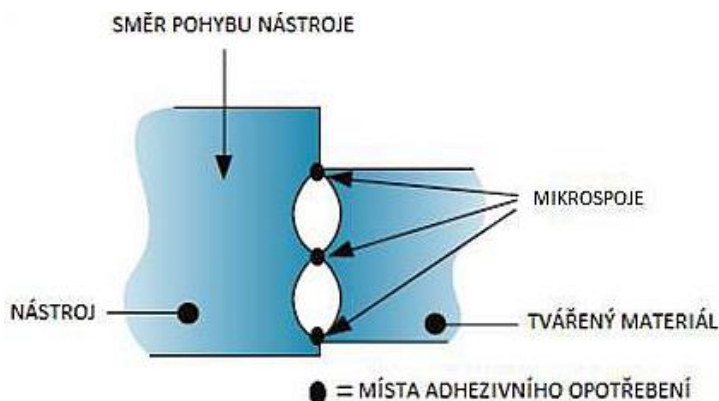
Obr. 5 Abrazivní opotřebení nástroje [6].

#### 1.4.2 Adhezivní opotřebení

V pásnu přilnutí, kde je relativní rychlost obou povrchů stejná, dochází ke styku nejvyšších nerovností nástroje a součásti. Vznikající síly narušují povrchové vrstvy a za působení teploty a tlaku vytváří mikrospoje. Tento jev se nazývá adheze. Po opuštění pásma přilnutí se vazby přeruší a z úlomků se stávají abrazivní částice, které způsobují tvorbu mikrotrhlin a přispívají k rýhování povrchu [2, 6].



Princip adhezivního opotřebení je na obr. 6.

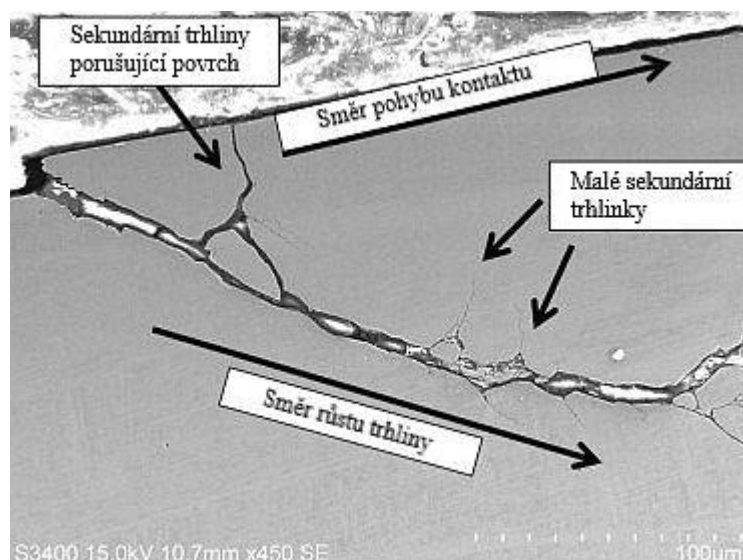


Obr. 6 Adhezivní opotřebení nástroje [6].

### 1.4.3 Kontaktní únava

K opotřebení kontaktní únavou dochází při styku malých ploch (příkladem z praxe může být styk konkávní a konvexní plochy při procesu válcování). Generuje se zde kontaktní tlak, který nabývá hodnot až v řádu jednotek GPa a šíří se napříč kontaktem v povrchové vrstvě materiálu. Nečistoty, zvláště ostré a tvrdé částice, se dostávají mezi kontaktní plochy a dochází k tvorbě mikrotrhlin. Ty se dalším působením spojují ve větší trhliny, čímž nastává lom materiálu a tvorba jamek. Kontaktní únavové trhliny mají v porovnání s trhlínami způsobenými tepelnou únavou odlišný směr šíření – při kontaktní únavě mají trhliny sklon od 0 do 30° vzhledem k tečně povrchu, kdežto trhliny způsobené tepelnou únavou se šíří ve směru kolmém na povrch [2, 6].

Trhliny způsobené kontaktní únavou jsou zobrazeny na obr. 7.



Obr. 7 Trhliny způsobené kontaktní únavou [7].

Pro snížení dopadů kontaktní únavy se provádí chemicko-tepelné zpracování, např. nitridace. Nitridace je nasycení povrchu oceli dusíkem při teplotě kolem 500 °C. O tvrdosti nitridační vrstvy rozhoduje obsah těch legujících prvků v oceli, které tvoří tvrdé nitridy (Cr, Al, Mo, V a W). Povrchová vrstva tak má větší odolnost proti opotřebení. Vhodné je také použít materiál s co nejnižším obsahem nečistot a nízkou drsností povrchu dosaženou např. leštěním [6, 8].

## 2 LOMOVÉ CHOVÁNÍ MATERIÁLU

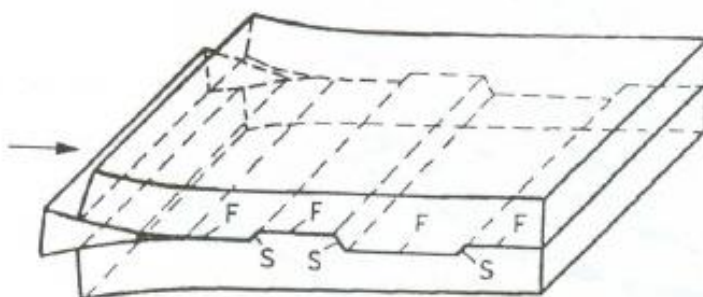
Vlastnost materiálu, která charakterizuje odolnost materiálu proti vzniku a dalšímu růstu trhlin, se nazývá lomová houževnatost. Tato odolnost spočívá ve schopnosti absorbovat určité množství energie, než dojde k dosažení jistého mezního stavu (k porušení) [9].

### 2.1 Lom materiálu

Ve fraktografii, jak se nazývá nauka o lomech, se podle energie potřebné ke vzniku lomové plochy dělí lomy na [10]:

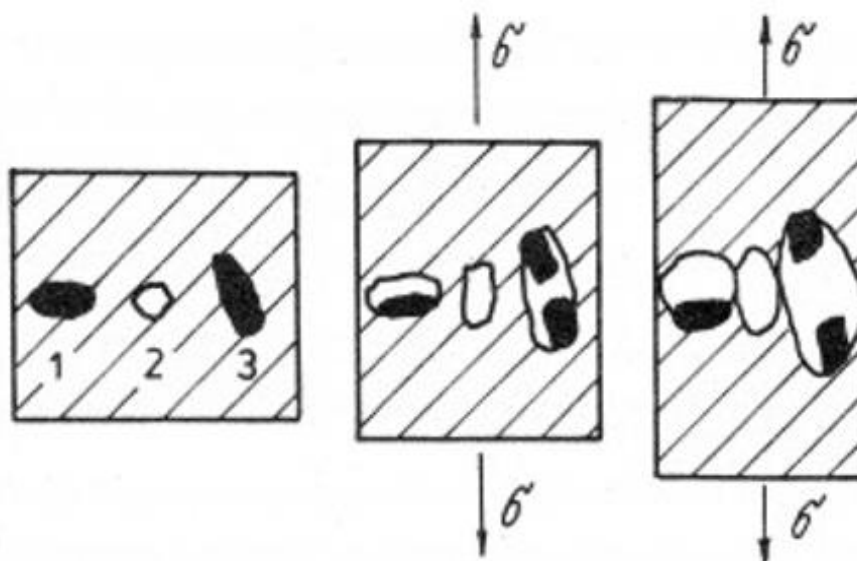
- lom křehký – lomová plocha vzniká při nízké spotřebě energie, napětí je blízké mezi pružnosti, nedochází ke zřetelné plastické deformaci;
- lom houževnatý nebo také tvárný – lomová plocha vzniká při vysoké spotřebě energie, lom nastává po předchozí plastické deformaci a průvodním jevem obvykle bývá lokální zúžení materiálu.

Model křehkého porušení je popisován jako ostrý klín zasunutý do materiálu, čímž dochází ke vzniku trhliny, která dále pokračuje v mnoha rovnoběžných krystalografických rovinách. Postupně se spojují jednotlivé plochy (fazety) a vznikají tzv. stupně štěpení. Tyto stupně způsobují charakteristické kresby na lomové ploše. Model křehkého porušení s vyobrazením fazet F a stupňů S je znázorněn na obr. 8 [11, 12].



Obr. 8 Křehký lom materiálu [11].

Při houževnatém (tvárném) lomu se uplatňují skluzové mechanismy a výrazná plastická deformace. Cizí částice vyskytující se v materiálu způsobují vlivem rostoucího napětí vznik dutinek na hranicích cizích částic se základním materiálem. Dutinky se zvětšují, můstky mezi nimi se naopak zmenšují a po jejich zániku dochází k porušení materiálu. Tento proces je ve třech krocích zobrazen na obr. 9. Pro tvárné porušení je typický výskyt jamek na lomové ploše [11, 12].



Obr. 9 Houževnatý lom materiálu [11].

Z hlediska přívodu energie potřebné k šíření trhliny se lom rozlišuje na stabilní a nestabilní. Lom je stabilní, pokud je nutné k šíření trhliny dodávat energii, která by překonala odpor materiálu proti růstu trhliny. Oproti tomu nestabilní lom přisun další energie nepotřebuje, k šíření trhliny v tomto případě stačí deformační energie akumulovaná v materiálu. Stav tělesa, kdy dochází ke ztrátě stabilního šíření trhliny a dochází k jejímu nestabilnímu růstu, se nazývá mezní stav stability trhliny tělesa [13, 14].

## 2.2 Zkoušky odolnosti materiálu proti křehkému porušení

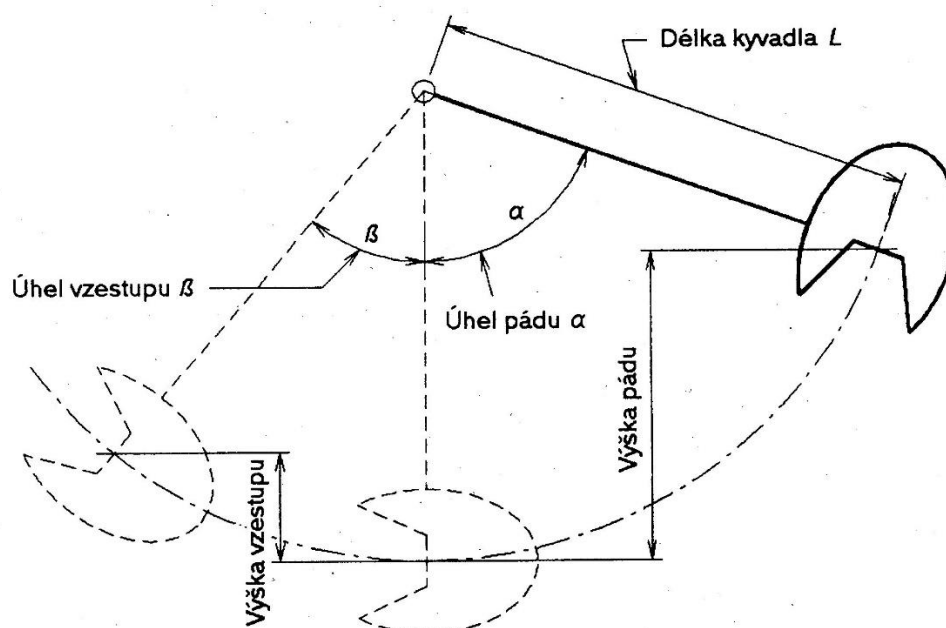
Zkoušky odolnosti proti vzniku křehkého lomu se obvykle provádí z těchto důvodů [15]:

- posouzení, jak velká je možnost výskytu trhlín při určitém zatěžování daného materiálu;
- volba vhodného materiálu pro danou aplikaci;
- kontrola jakosti při výrobě nebo převzetí součásti;
- zjišťování příčin vzniku křehkého lomu;
- získání parametrů důležitých pro konstrukci – např. mezní provozní teploty nebo největší přípustná délka trhliny.

### 2.2.1 Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho

Nejpoužívanější metodou pro zjišťování odolnosti proti křehkému porušení u materiálů vykazujících tranzitní lomové chování (změna charakteru lomu z houževnatého

na křehký v důsledku snížení teploty, často kovy s mřížkou BCC nebo HCP) je zkouška rázem v ohybu podle Charpyho. Zkušební tyč s vrubem tvaru U (nárazová práce se v tomto případě označuje KU) nebo V (nárazová práce KV), podepřená na obou koncích, je přerážena jedním rázem kyvadlového kladiva. Měřenou veličinou je nárazová práce, což je práce spotřebovaná na přerážení zkušebního tělesa. Její hodnota je měřítkem odolnosti proti rázovému namáhání materiálu. Schéma kyvadlového Charpyho kladiva je na obr. 10 [15, 16, 17].

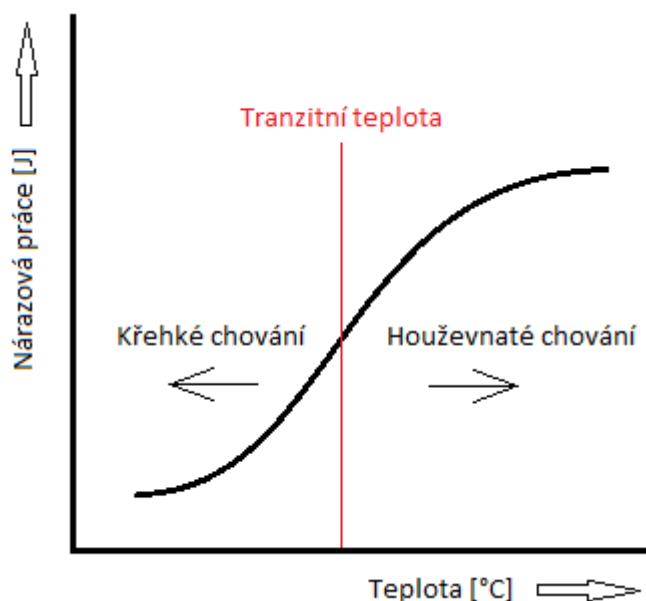


Obr. 10 Kyvadlové Charpyho kladivo [15].

Počáteční pohybová energie kyvadla bývá v laboratořích nejčastěji 300 J – tato energie se získá součinem výšky pádu a hmotností beranu kladiva. Protože je jednodušší měřit úhel vzestupu než výšku, je na kladivu umístěna vlečná ručička a nárazová práce je určena tímto úhlem [15].

Podrobnější parametry, jako např. tvar a rozměry zkušební tyče nebo provedení vrubů, jsou dány normou ČSN EN 10 045-1.

Největší význam pro oceli má vyhodnocení závislosti nárazové práce na teplotě, výsledkem měření je tzv. tranzitní (nebo také přechodová) křivka. Příklad tranzitní křivky je zobrazen na obr. 11 [11].



Obr. 11 Tranzitní křivka [11].

Jak je z diagramu patrné, důležitou roli zde hraje tzv. tranzitní teplota. Tato teplota leží uvnitř přechodové oblasti a rozděluje porušování materiálu na křehké (vzorky zkoušené pod tranzitní teplotou) a houževnaté (vzorky zkoušené nad tranzitní teplotou). Tranzitní teplota daného materiálu není konstantní, na její hodnotu mají vliv také [11, 18]:

- rychlost deformace;
- způsob zatěžování;
- tepelné zpracování.

Zkouška rázem v ohybu je nejstarším a nejrozšířenějším zástupcem zkoušek využívajících teplotně-tranzitní přístup. Mezi další patří např. zkouška padajícím závažím, zkouška velkých těles a zkouška teploty zastavení trhliny [18].

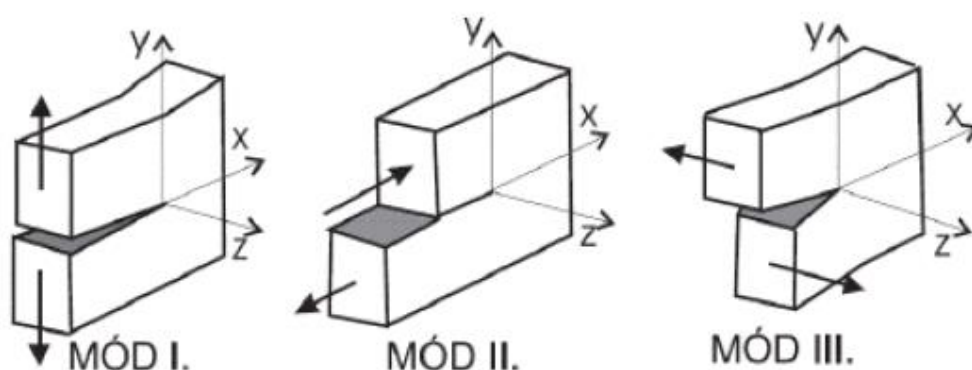
Druhý přístup zkoušení odolnosti materiálu proti křehkému porušení využívá poznatky lomové mechaniky. Sem se řadí např. zkouška lomové houževnatosti a zkouška kritického rozevření trhliny. Tento přístup umožňuje popsat vlastnosti trhliny a jejich stabilní, resp. nestabilní růst [18].

### 2.2.2 Lomová mechanika

Lomová mechanika je vhodná především při řešení problémů jako tečení materiálu při vysoké teplotě (tzv. creep), šíření únavových trhlin, nebo koroze pod napětím. Lomová mechanika se podle závislosti mezi napětím a deformací dělí na dvě disciplíny [9]:

1. Lineární elastická lomová mechanika (LELM)
2. Elasticko-plastická lomová mechanika (EPLM)

Lineární elastická lomová mechanika uvažuje lineární závislost mezi napětím a deformací, tzn. platí pouze v oblasti Hookova zákona, neuvažuje plastické deformace. Vznikla společně se zavedením faktoru intenzity napětí  $K$  [ $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ ]. Faktor  $K$  se podle způsobu zatěžování dále upřesňuje na  $K_I$  (mód I, stav jednoosé napjatosti, rozevírání trhliny),  $K_{II}$  (mód II, smyk) a  $K_{III}$  (mód III, střih). Jednotlivé způsoby zatěžování jsou zobrazeny na obr. 12 [9, 17].



Obr. 12 Způsoby zatěžování [9].

Pro faktor intenzity napětí na čele trhliny  $K_I$  platí vztah (1) [19]:

$$K_I = Y \cdot \sigma_v \cdot \sqrt{\pi \cdot a}, \quad (1)$$

kde:

$K_I$  [ $\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$ ] je faktor intenzity napětí,

$Y$  [-] je korekční funkce,

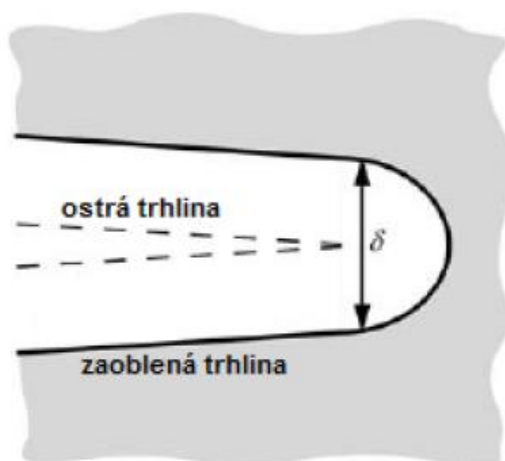
$\sigma_v$  [ $\text{MPa}$ ] značí vztažné napětí,

$a$  [ $\text{mm}$ ] vyjadřuje délku trhliny.

Vztažné napětí  $\sigma_v$  má hodnotu maximálního napětí v tom místě tělesa, kde se nachází trhlina. V momentě, kdy faktor intenzity napětí dosáhne hodnoty lomové houževnatosti daného materiálu při určité teplotě a okolních podmínkách, dojde k lomu [19].

Zavedení elasticko-plastické lomové mechaniky umožnilo definovat pojmy jako rozevření na čele trhliny (CTOD – *crack tip opening displacement*) a J-integrál.

Při zkoušení některých materiálů pomocí LELM bylo zjištěno, že jejich houževnatost je příliš velká a jejich lomové chování nelze s využitím dosavadních poznatků vyhodnotit. Dále bylo zjištěno, že v průběhu růstu trhliny se zvětšuje zaoblení původně ostrého kořene trhliny při jejím vzniku. Zaoblení je tím větší, čím větší je houževnatost materiálu. Z tohoto důvodu byla zavedena veličina  $\delta$  – rozevření na čele trhliny, zkratka CTOD. Zaoblení kořene je znázorněno na obr. 13 [17].



Obr. 13 Zaoblení kořene trhliny [17].

Pro rozevření na čele trhliny platí vztah (2) [20]:

$$CTOD = \delta = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{E' \sigma_e}, \quad (2)$$

kde:

$\delta$  [mm] je rozevření na čele trhliny,

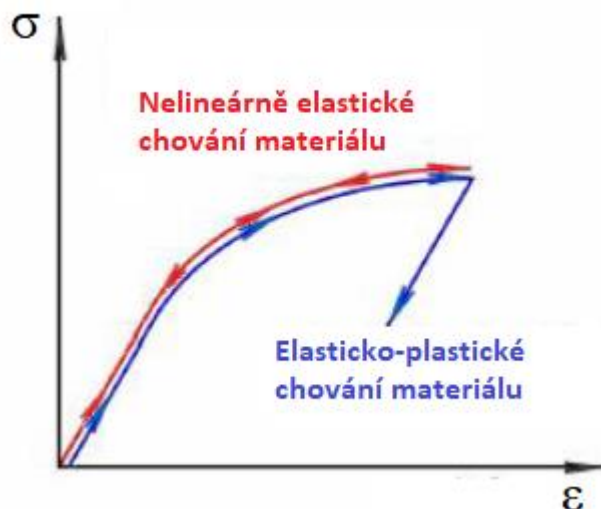
$K_I$  [MPa·√m] vyjadřuje faktor intenzity napětí,

$E'$  [GPa] značí efektivní Youngův modul pružnosti,

$\sigma_e$  [MPa] je mez pružnosti.

Důležitým parametrem popisující lom v nelineárním materiálu je tzv. J-integrál. Základem koncepce je vysvětlení průběhů zatěžování a odlehčení elasticko-plastického a nelineárně elastického materiálu. Chování takových materiálů při jednoosé napjatosti je zobrazeno na obr. 14 [17].





Obr. 14 Průběh napětí nelineárně elastického a elasticko-plastického materiálu [17].

Z diagramu je zjevné, že při zatěžování je průběh napětí obou materiálů totožný, avšak reakce na odlehčení je odlišná. V případě elasticko-plastického materiálu probíhá odlehčení po přímce, jejíž sklon je závislý na Youngově modulu, zatímco u nelineárně elastického materiálu je odlehčovací křivka stejná jako křivka zatěžovací. Tím pádem při cyklickém zatěžování elasticko-plastického materiálu může jedné hodnotě přetvoření  $\varepsilon$  odpovídat více hodnot napětí  $\sigma$  a popis takového materiálu s nevratnými plastickými deformacemi je daleko složitější než analýza elastického materiálu. Pro jednoosou napjatost (mód zatěžování I) a za předpokladu, že nedochází k odlehčování, se tedy mohou teorie plasticity a nelineární elasticity považovat za shodné. Pro tento případ platí vztah (3) [17, 20]:

$$J_I = -\frac{dU}{da} \quad (3)$$

Slovně vyjádřeno,  $J_I$ -integrál je roven změně potenciální energie tělesa  $dU$  v závislosti na změně délky trhliny  $da$ .  $J_I$ -integrál slouží především k určení intenzity napětí na čele trhliny pro tělesa různých tvarů. K lomu dochází v momentě, kdy  $J_I$  dosáhne kritické hodnoty  $J_{IC}$ . Tato hodnota určuje odolnost materiálu proti vzniku lomu a také pomocí ní lze určit lomová houževnatost za podmínek plastické deformace před čelem trhliny  $K_{JC}$  dle vztahu (4) [17]:

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{J_C E}{1-\nu^2}}, \quad (4)$$

kde:

$K_{JC}$  [MPa·√m] je lomová houževnatost určená z  $J_C$ ,

$J_C$  [MPa·m] vyjadřuje kritickou hodnotu J-integrálu,

$E$  [GPa] je Youngův modul pružnosti,

$\nu$  [-] značí Poissonovo číslo.

### 3 MOŽNOSTI ELIMINACE LOMOVÉHO PORUŠENÍ NÁSTROJŮ PŘI TVÁŘENÍ ZA TEPLA

Životnost nástrojů zásadním způsobem ovlivňuje efektivitu výroby a náklady spojené s výrobou daných nástrojů. Obzvláště v případě velkosériové výroby je nutné věnovat životnosti nástrojů náležitou pozornost s cílem snižování nákladů spojených s výměnou nástrojů. V jedné z předchozích kapitol byly popsány jednotlivé mechanismy porušení tvářecích nástrojů pracujících za vysokých teplot, v následující části budou představeny možnosti, jak tyto degradace v praxi eliminovat a zvyšovat tak životnost uvedených nástrojů.

Vedle vhodného konstrukčního řešení nástroje jde o tyto oblasti:

- volba vhodného materiálu a tepelného zpracování;
- aplikace povrchových úprav;
- chlazení a předehřev nástrojů.

#### 3.1 Volba vhodného materiálu a tepelného zpracování

Při tváření za tepla jsou nástroje vystaveny kombinaci účinků, které na ně působí značně nepříznivě. Je to především cyklické působení vysokých teplot – např. kování nízkouhlíkové oceli probíhá při teplotách kolem 1 200 °C. Kromě toho se musí vzít v úvahu působení vysokého měrného tlaku kvůli velkému mechanickému namáhání, které navíc může působit ve formě rázů. Z těchto důvodů se u nástrojů požadují tyto vlastnosti: tvrdost a pevnost i za vysokých teplot, odolnost proti mechanické a tepelné únavě a houževnatost [21, 22].

Co se chemického složení oceli týče, je vyšší odolnosti proti působení vysokých teplot dosaženo zejména přísadou niklu nebo molybdenu. Tvrdost a prokalitelnost zvyšují karbidotvorné prvky, jako jsou chrom, vanad, wolfram, mangan a titan. Protože ale vyšší obsah karbidotvorných prvků má za následek nežádoucí snižování houževnatosti, není obsah těchto prvků v oceli tak vysoký jako třeba u obráběcích nástrojů [21].

Dobu životnosti také podstatně ovlivňuje správně provedené tepelné zpracování nástrojové oceli. Nevhodný způsob zušlechtní může způsobit deformace nástroje při nízké tvrdosti, nebo naopak křehké chování při příliš vysoké tvrdosti a nízké houževnatosti. Jednou z metod zpracování, která je v poslední době často předmětem zkoumání, je kryogenní zpracování. Jedná se o proces zmrazování na teplotu až -190 °C pomocí kapalného dusíku. Tento děj se zařazuje mezi kalení a popouštění. Výstupy kryogenního zpracování jsou

např. zvýšení odolnosti proti opotřebení, otěruvzdornosti, pevnosti v tahu a houževnatosti, dále snížení zbytkového napětí a křehkosti a snazší čištění. Protože proces mění strukturu v celém objemu, je možno opakovaně nástroj přebušovat bez porušení efektu kryogenního zpracování. Následné popouštění má za následek zvýšení odolnosti proti abrazi. Uvedené změny vlastností ale výrazně závisí na jednotlivých materiálech. Z většiny studií plyne, že k výraznému zlepšení dochází u chromových a chrom-vanadových nástrojových ocelí, kdežto v případě rychlořezných ocelí je dopad kryogenního procesu spíše negativní. Proces kryogenního zpracování probíhá v tzv. kryogenním boxu, který je na obr. 15 [23, 24].



Obr. 15 Kryogenní box CES [25].

### 3.2 Aplikace povrchových úprav

Zvýšení životnosti nástrojů může být dosaženo vhodnou technologií úpravy povrchu. Příkladem je zpracování založené na difuzi – nitridace, cementace apod. Nitridace zvyšuje otěruvzdornost, ale v nitridované povrchové vrstvě vzniká pnutí, které usnadňuje šíření trhlin způsobených např. tepelnou únavou směrem do základního materiálu [21].

Další možností uplatnění povrchové úpravy nástroje je povlakování. Touto metodou se na základní materiál nanáší tenká vrstva nebo multivrstva o vysoké tvrdosti, pevnosti a výborné odolnosti proti opotřebení. Povlak také tvoří ochranu proti difuzním mechanismům opotřebení. Těchto vlastností je dosaženo díky tomu, že povlak neobsahuje žádné pojivo a má daleko jemnější zrnitost a méně strukturních defektů v porovnání se základním materiálem [26].

Povlakování je rozděleno na dvě základní metody – CVD a PVD.

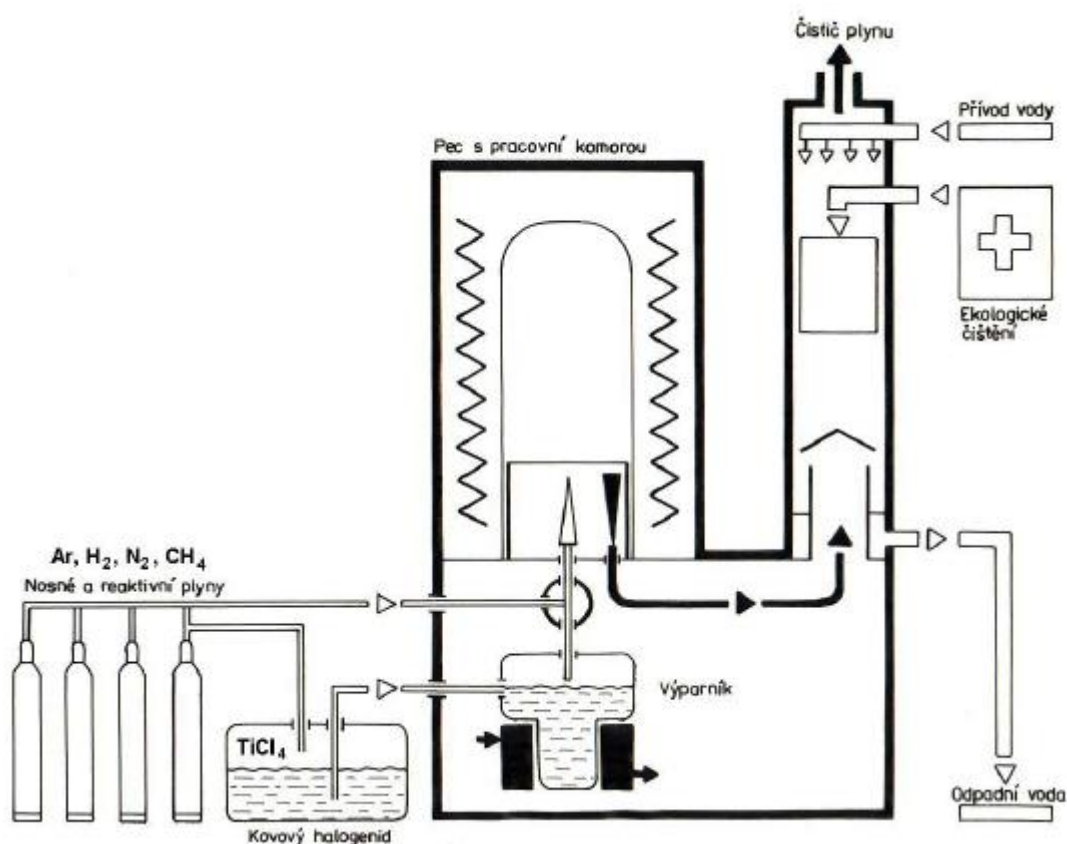
#### 3.2.1 CVD povlakování

CVD (*Chemical Vapour Deposition*) je metoda povlakování založená na reakci plyných chemických látek v plazmě. Výchozí plyny obsahují stabilní prchavou sloučeninu, která se po dodání energie chemicky rozkládá. Potřebnou energií může být ohřev, plazmový oblouk, nebo laser. Aby reakce proběhla a ukládáním produktů rozkladu na základní materiál se vytvořil povlak, je nutná přítomnost také nekovového reaktivního plynu, např.  $N_2$ ,  $NH_4$ , nebo  $CH_4$ . Reakce probíhá za vysokých teplot (až 1 200 °C) [27].

CVD povlakování je výhodné z hlediska výborného uchycení k povrchu podkladového materiálu, vysoké hustoty, teplotní stability a homogenity povlaku. Za zmínku stojí také rovnoměrná tloušťka povlaku i u tvarově složitých nástrojů a relativně nízké pořizovací a provozní náklady. Naopak mezi nevýhody této metody patří vysoké pracovní teploty, což může mít za následek zhoršení vlastností povlakovaného materiálu i povlaku. Také nelze vytvářet povlaky některými kombinacemi různých kovů (např.  $TiAlN$ ) a není možné povlakovat ostré hrany. Energetická a časová náročnost je vyšší než u PVD a kvůli rozdílným koeficientům tepelné roztažnosti vzniká ve vrstvě tahové napětí [27].

Dnes je metoda CVD využívána především pro povlakování vyměnitelných břitových destiček obráběcích nástrojů [28].

Schéma aparatury pro CVD povlakování je na obr. 16.



Obr. 16 Schéma aparatury pro CVD povlakování [26].

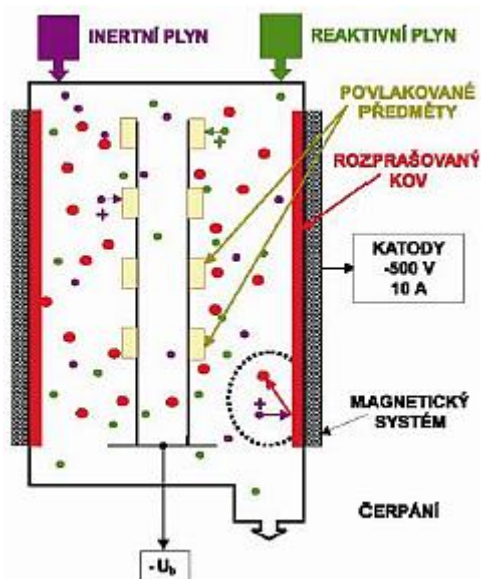
### 3.2.2 PVD povlakování

PVD (*Physical Vapour Deposition*) povlaky jsou nanášeny za relativně nízkých pracovních teplot (obvykle do 500 °C) a nízkého tlaku (0,1 až 1 Pa). Komoru povlakovacího zařízení tvoří inertní a reaktivní plyn – příkladem mohou být Ar a N<sub>2</sub>. Částice atomů nebo shluku atomů kovů jsou uvolňovány ze zdroje – terče – fyzikálními metodami, jako jsou napařování, naprašování nebo iontová implantace. Tyto částice jsou ionizovány, reagují s atmosférou komory a jsou urychlovány záporným předpětím přivedeným na substrát. Dopadající atomy tak tvoří tenké vrstvy homogenního povlaku [27].

Povlakování metodou PVD přináší řadu výhod – umožňuje povlakovat ostří nástrojů s poloměrem zaoblení pod 0,02 mm, nedochází k nežádoucímu tepelnému ovlivnění materiálu a je ekologičtější než metoda CVD. Také je možné vytvářet vícevrstvé povlaky kombinací různých typů vrstev (např. vrstvy kluzné a ošetrné) [27, 29].

K povlakování metodou PVD je ovšem zapotřebí složitější vakuový systém. Další nevýhodou je, že se povlak netvoří (nebo tvoří nedostatečně) na plochách, které nejsou orientovány ve směru pohybu deponovaných částic. Pro rovnoměrné vytvoření povlaku na všech žádaných plochách je tedy nutno povlakovaným nástrojem v komoře pohybovat [29].

Schéma metody PVD pomocí naprašování je zobrazeno na obr. 17.



Obr. 17 PVD povlakování naprašováním [26].

### 3.3 Chlazení a předehřev nástrojů

Při tváření za tepla může docházet vlivem styku tvářeného materiálu o vysoké teplotě s tvářecím nástrojem k velkému vyhřátí povrchové vrstvy nástroje, čímž nastává popuštění a pokles pevnosti jeho funkční části. Překročení teploty rekrystalizace je navíc doprovázeno objemovými změnami. V některých případech je proto nutné zavést chlazení a mazání nástroje. Způsob a intenzitu chlazení je nutno zvažovat při každé operaci zvlášť. Např. příliš prudké nebo nerovnoměrné chlazení způsobuje vznik pnutí a tvorbu trhlin. Při požadavku nižší intenzity chlazení se využívá stlačený vzduch, pokud toto není dostatečné, probíhá chlazení vodní sprchou. Záleží také na materiálu nástroje, např. u vysokolegovaných ocelí nelze chlazení vodou zařadit [30].

Předehřev se při tváření za tepla provádí z více důvodů. Vysokolegované nástrojové oceli, především wolframové, mají po tepelném zpracování relativně nízkou houževnatost.

Aby se proto snížilo riziko tvorby trhlin, používá se předehřátí nástroje na teplotu 200 až 300 °C [30, 31].

Další pozitivní přínos předehřevu spočívá ve snížení teplotního gradientu mezi povrchem a jádrem tvářecího nástroje a v poklesu tepelného pnutí. Při kontaktu výkovku s předehřátým nástrojem se navíc snižuje přestup tepla (zpomaluje se ochlazování výkovku). Nižší rychlost ochlazování zabraňuje nárůstu pevnosti tvářeného materiálu a tím také zvyšování měrných tlaků působících na nástroj. Tímto je dosaženo menšího opotřebení nástroje plastickou deformací otěrem [30].

Předehřívání nástrojů se provádí různými způsoby, např. pomocí ohřátého ocelového bloku nebo desky přímo na kovacím stroji, plynovým hořákem, nebo na pískovém roštu ohříváním plynovými hořáky [31].



## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

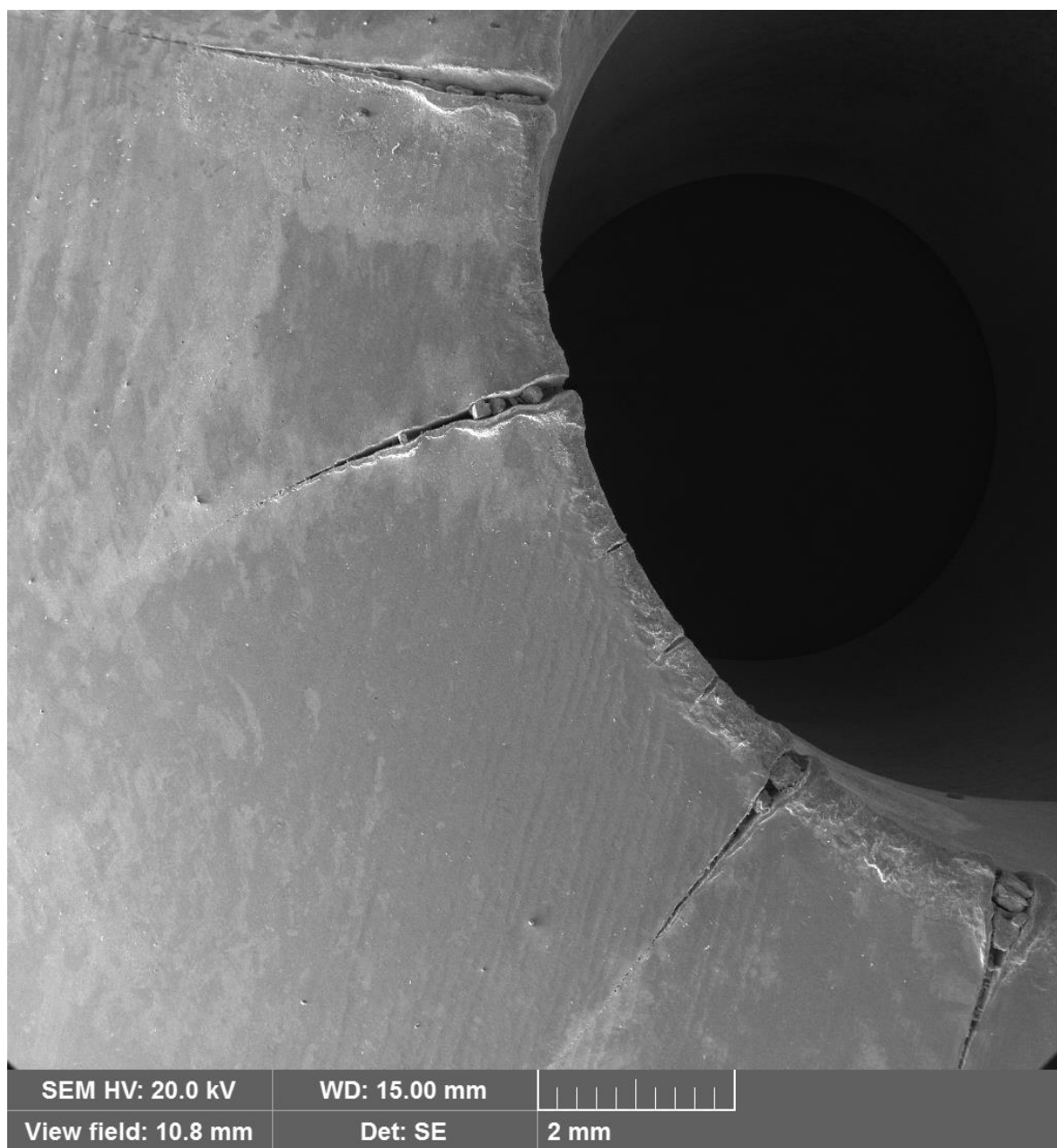
V praktické části práce je hodnocen vliv povlakování na trvanlivost tvářecího nástroje během procesu kování konce ocelové trubky na hydraulickém lisu.

### 4.1 Výchozí stav

Uvedené tváření probíhá za teplot kolem 1 000 °C. Vlivem kombinovaného tepelně-mechanického zatížení dochází během pracovního procesu k degradaci materiálu. Porušení se projevuje tvorbou a šířením trhlin kolem otvoru matrice, což postupně vede až k praskání matrice. Nástroj s trhlínami byl pozorován pomocí elektronového mikroskopu, snímky jsou zachyceny na obr. 18 a 19.



Obr. 18 Nástroj s trhlínami.



Obr. 19 Nástroj s trhlinami.

Jak je vidět, trhliny se šíří od povrchu v kolmém směru. Vzhledem k působení vysoké teploty během pracovního procesu a směru šíření trhlín se jedná o degradaci materiálu způsobenou tepelnou únavou. Na okraji otvoru lze také pozorovat abrazivní opotřebení.

#### 4.2 Materiál nástroje

Testována byla trvanlivost matrice z nástrojové oceli pro práci za tepla, jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1 Chemické složení materiálu matrice.

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
[hm. %]	0,50	0,20	0,25	4,50	3,00	0,55

Výrobce doporučuje tepelné zpracování na tvrdost 52–57 HRC.

Výrobce dále uvádí tyto vlastnosti:

- dobrá tepelná vodivost;
- homogenní struktura;
- vysoká houževnatost a tažnost;
- dobrá svařitelnost;
- odolnost proti opotřebení za tepla.

#### 4.3 Metoda řešení problému

Z možností zvýšení trvanlivosti nástroje bylo vybráno povlakování metodou PVD. Za tímto účelem byli kontaktováni čtyři dodavatelé provádějící povlakování.

Povlaky vhodné pro tuto aplikaci musí splňovat tyto požadavky:

- velká ořezuvzdornost;
- vysoká maximální teplota použití – alespoň 1 000 °C.

#### 4.4 Charakteristiky jednotlivých povlaků

V tabulkách 2 až 5 jsou uvedeny charakteristiky zvolených povlaků 1 až 4 tak, jak je uvádějí jednotliví dodavatelé.

Tab. 2 Charakteristika povlaku 1.

Maximální teplota použití	1 100 °C
Koeficient tření na oceli	0,45
Tloušťka povlaku	2,0–5,0 µm
Barva	Břidlicově šedá
Tvrdost	3 200 ± 300 HV

Tab. 3 Charakteristika povlaku 2.

Typ povlaku	2. generace AlTiN supernitridů
Maximální teplota použití	1 100 °C
Barva	Antracitová
Mikrotvrdost [HV0,05]	3 700

Tab. 4 Charakteristika povlaku 3.

<b>Maximální teplota použití</b>	1 100 °C
<b>Koeficient tření</b>	0,35
<b>Barva</b>	Šedá
<b>Nanotvrdost</b>	40 GPa
<b>Tloušťka povlaku</b>	2,0–4,0 µm
<b>Teplota depozice</b>	480 °C

Tab. 5 Charakteristika povlaku 4.

<b>Drsnost povrchu Ra</b>	0,15–0,20 µm
<b>Tepelná stabilita</b>	>1 000 °C
<b>Tloušťka povlaku</b>	2,0–4,5 µm
<b>Mikrotvrdost</b>	35 GPa

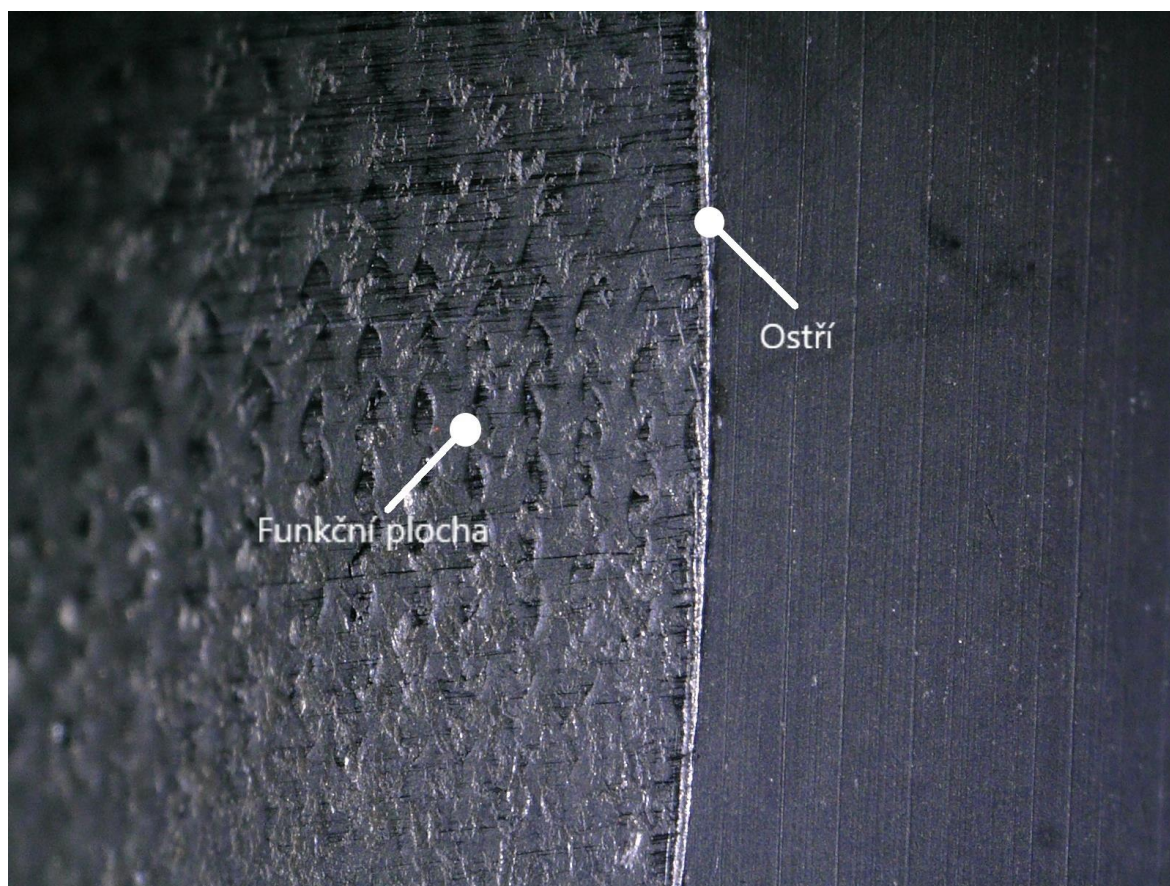
#### 4.5 Příprava nástrojů před povlakováním

Aby bylo možné naplno využít výhod povlakování nástrojů, je důležité věnovat pozornost jejich přípravě před samotným povlakováním. Mezi taková opatření patří [32]:

- broušení, případně leštění nástroje pro dosažení co nejnižší drsnosti povrchu;
- odmaštění k odstranění mastných, např. konzervačních látek z povrchu nástroje;
- suché pískování na odstranění zbytkových nečistot;
- mokré pískování pro dobrou a rovnoměrnou adhezi povlaků; také slouží jako leštění po povlakování;
- *stripping* – odstranění starých povlaků chemickými nebo elektro-chemickými metodami;
- odhliníkování;
- odstranění černění;
- omílání – zaoblení ostrých nerovností na břitech rotačních nástrojů;
- odjehlení – odstranění otřepů po ostření nástrojů.

Rozsah uvedených úprav je individuální – záleží na aplikaci, materiálu, povrchu a geometrii nástroje.

Na obr. 20 je zachycen střížný nůž ve stavu, který není příliš vhodný pro povlakování – jeho funkční plocha je příliš zvlněná (vysoká drsnost povrchu) a na ostří lze pozorovat ostřiny.



Obr. 20 Střížný nůž s příliš vysokou drsností povrchu a ostřinami.

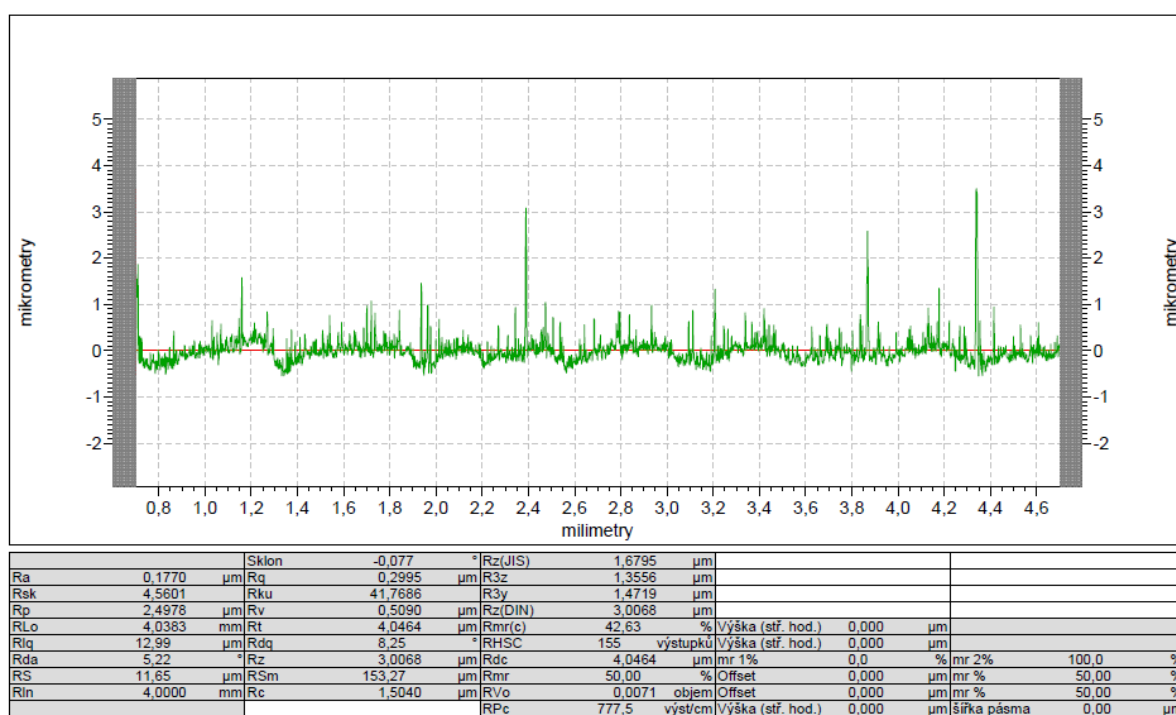
Za tohoto stavu hrozí, že by povlakování nesplnilo svůj účel – při styku nástroje s polotovarem by hrozilo jednak poškození povlaku a jednak vyštípnutí břitu. Takový nástroj je nutno přebrousit a případně aplikovat další úpravu povrchu.

#### 4.6 Testování povlakovaných nástrojů

Po aplikaci výše uvedených povlaků se u nástrojů – lisovacích matric – hodnotila struktura povrchu a následně byla testována trvanlivost ve výrobě.

##### 4.6.1 Struktura povrchu povlaků

Drsnost povrchu matric byla měřena na povlakovaných plochách pomocí profiloměru Taylor Hobson. Měření probíhalo postupně na čtyřech místech pro každý povlak. Protokol s vyhodnocenými parametry struktury povrchu v jednom místě je pro představu zobrazen na obr. 21.

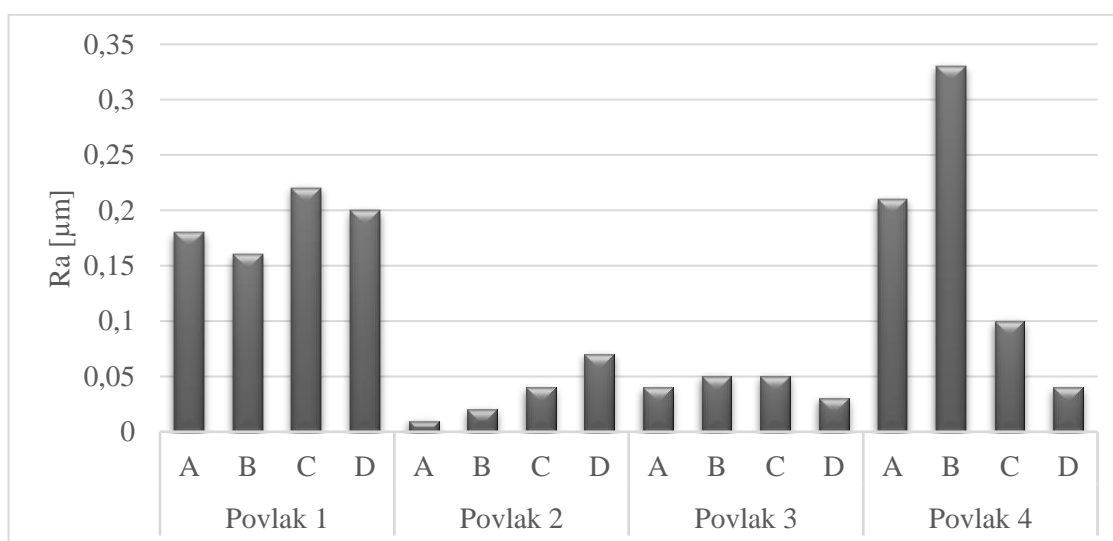


Obr. 21 Výsledek měření drsnosti povrchu.

Všechny naměřené hodnoty průměrné aritmetické úchylky profilu Ra jsou uvedeny v tab. 6 a graficky znázorněny na obr. 22.

Tab. 6 Drsnost povrchu jednotlivých povlaků.

	Povlak 1				Povlak 2			
Místo měření	A	B	C	D	A	B	C	D
Ra [μm]	0,18	0,16	0,22	0,20	0,01	0,02	0,04	0,07
	Povlak 3				Povlak 4			
Místo měření	A	B	C	D	A	B	C	D
Ra [μm]	0,04	0,05	0,05	0,03	0,21	0,33	0,10	0,04



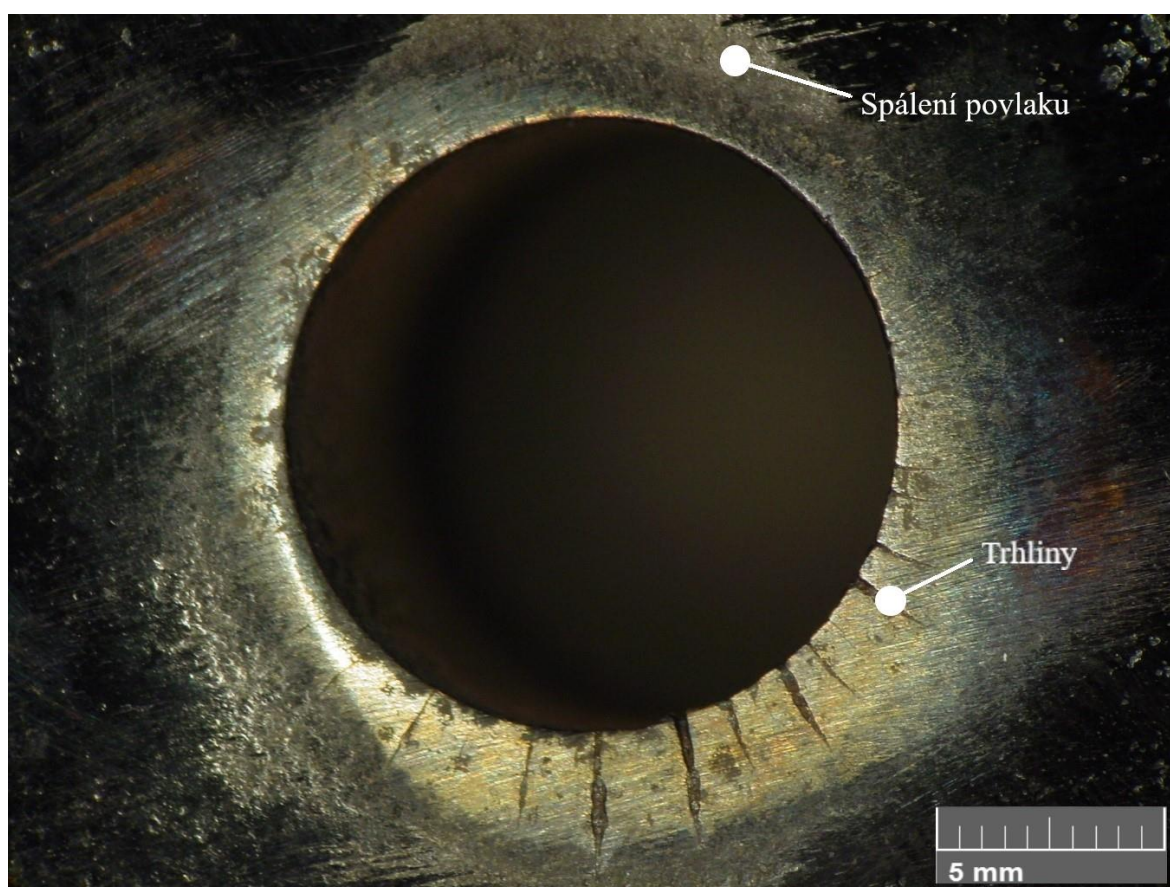
Obr. 22 Drsnost povrchu jednotlivých povlaků.

Hodnoty průměrné aritmetické úchylky Ra se pohybují v rozmezí 0,01–0,33  $\mu\text{m}$ . Největší rozptyl (0,04–0,33  $\mu\text{m}$ ) byl naměřen na nástroji s povlakem 4.

#### 4.6.2 Trvanlivost povlakovaných nástrojů

Trvanlivost povlakovaných nástrojů se hodnotila přímo během výroby. Nástroje byly vyřazeny po vizuálním zhodnocení, kdy trhliny byly viditelné na nástroji i na tvářené součásti a docházelo k tvorbě otřepů a spálení povlaku kolem otvoru na nástroji. V té chvíli byl zaznamenán počet pracovních cyklů na počítadle hydraulického lisu. Jeden z vyřazených nástrojů je zobrazen na obr. 23.





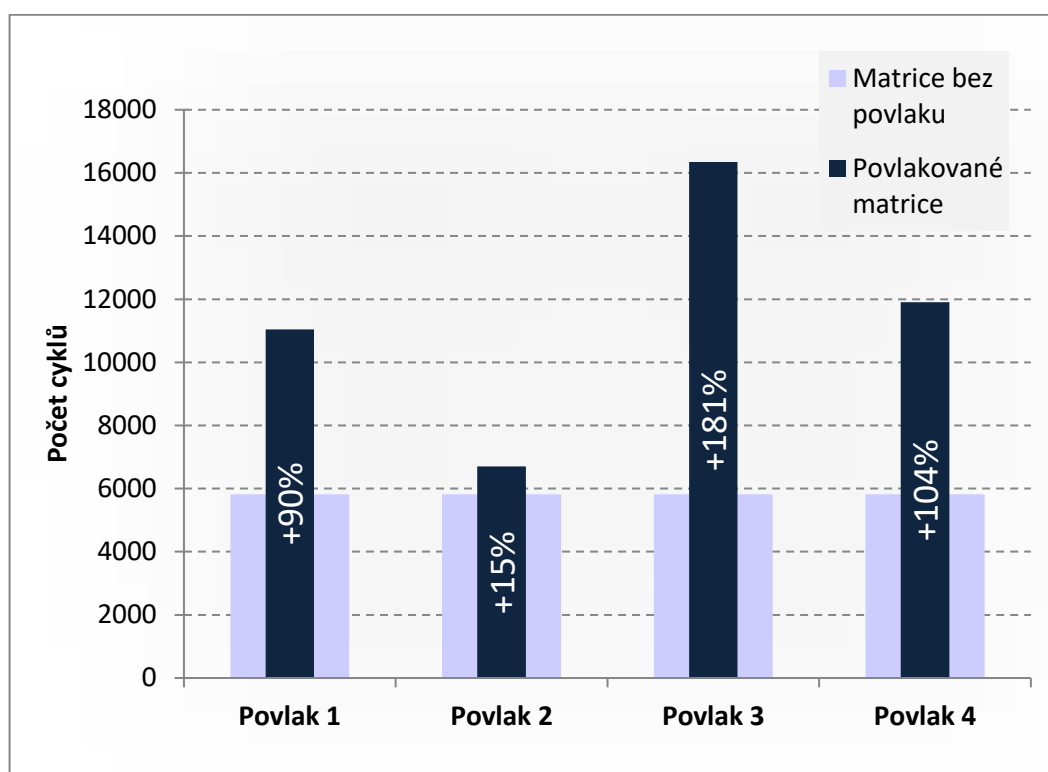
Obr. 23 Povlakovaná matrice po vyřazení.

Počty pracovních cyklů jednotlivých povlakovaných nástrojů do porušení jsou uvedeny v tab. 7 a graficky zobrazeny na obr. 24. Výsledky jsou porovnány s matricí bez povlaku, přičemž materiál této matrice je shodný se základním materiálem povlakovaných matic. Také pracovní podmínky a polotovar zůstaly nezměněny. V případě matrice bez povlaku byl naměřen počet 5 820 cyklů.

Tab. 7 Počet pracovních cyklů do porušení nástroje.

	Povlak 1	Povlak 2	Povlak 3	Povlak 4
<b>Počet pracovních cyklů do porušení nástroje</b>	11 042	6 698	16 348	11 900
<b>Rozdíl oproti nástroji bez povlaku</b>	Nárůst 90 %	Nárůst 15 %	Nárůst 180 %	Nárůst 104 %



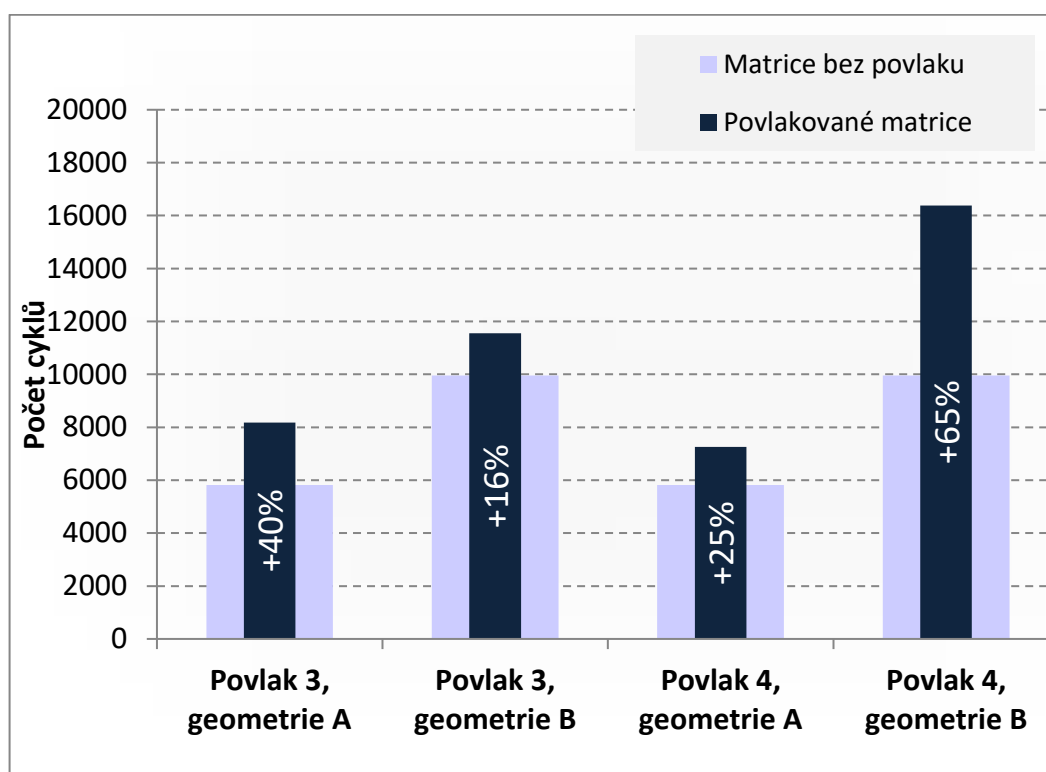


Obr. 24 Počet pracovních cyklů do porušení nástroje.

Dalším krokem bylo zopakovat měření pro povlaky, které při prvním testování dosáhly nejlepších výsledků (nejvyšší trvanlivosti) – povlaky č. 3 a 4. Základní materiál i oba povlaky zůstaly zachovány. V tomto případě ale byly testovány také různé geometrie nástroje, označeny jako geometrie A (stejná jako při prvním testování) a geometrie B. Výsledky jsou uvedeny v tab. 8 a graficky zobrazeny na obr. 25. Trvanlivost nástroje s geometrií B bez povlaku byla 9 960 cyklů.

Tab. 8 Počet pracovních cyklů do porušení nástroje.

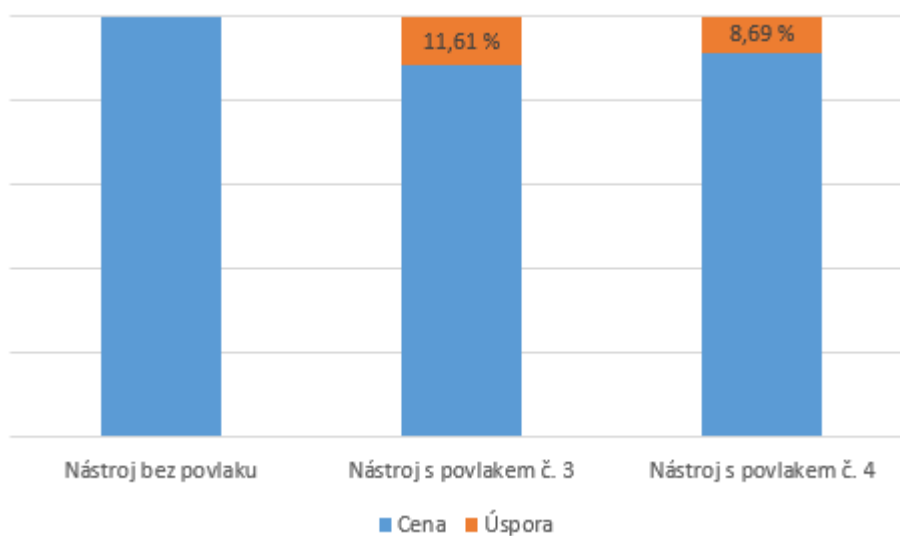
	Povlak 3		Povlak 4	
	Geometrie A	Geometrie B	Geometrie A	Geometrie B
Počet pracovních cyklů do porušení nástroje	8 176	11 556	7 261	16 386
Rozdíl oproti nástroji bez povlaku	Nárůst 40 %	Nárůst 16 %	Nárůst 25 %	Nárůst 65 %



Obr. 25 Počet pracovních cyklů do porušení nástroje.

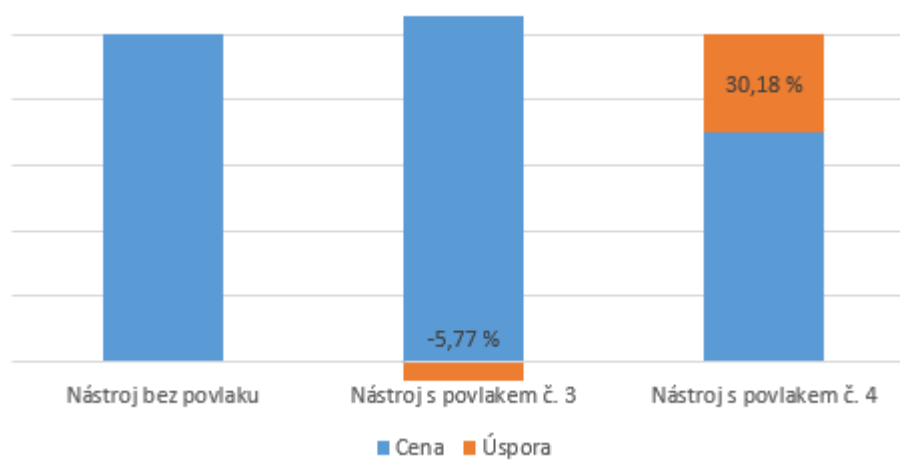
#### 4.6.3 Ekonomická výhodnost

Po vyhodnocení trvanlivosti povlakovaných nástrojů byla posuzována ekonomická výhodnost, kdy se porovnávaly potřebné náklady za nástroje pro výrobu určitého počtu součástí. I když trvanlivost nástrojů po povlakování ve všech případech vzrostla, o uplatnění povlakování v praxi rozhoduje až jeho ekonomická výhodnost, přičemž určujícím faktorem jsou náklady spojené s povlakováním. Na obr. 26 je grafické znázornění procentuálních finančních úspor při výrobě určitého počtu součástí povlakovanými nástroji oproti výrobě stejného počtu součástí nástroji bez povlaku. Toto srovnání vychází z výsledků testování trvanlivostí v tab. 8. a platí pro geometrii A.



Obr. 26 Úspory při použití povlakovaných nástrojů geometrie A.

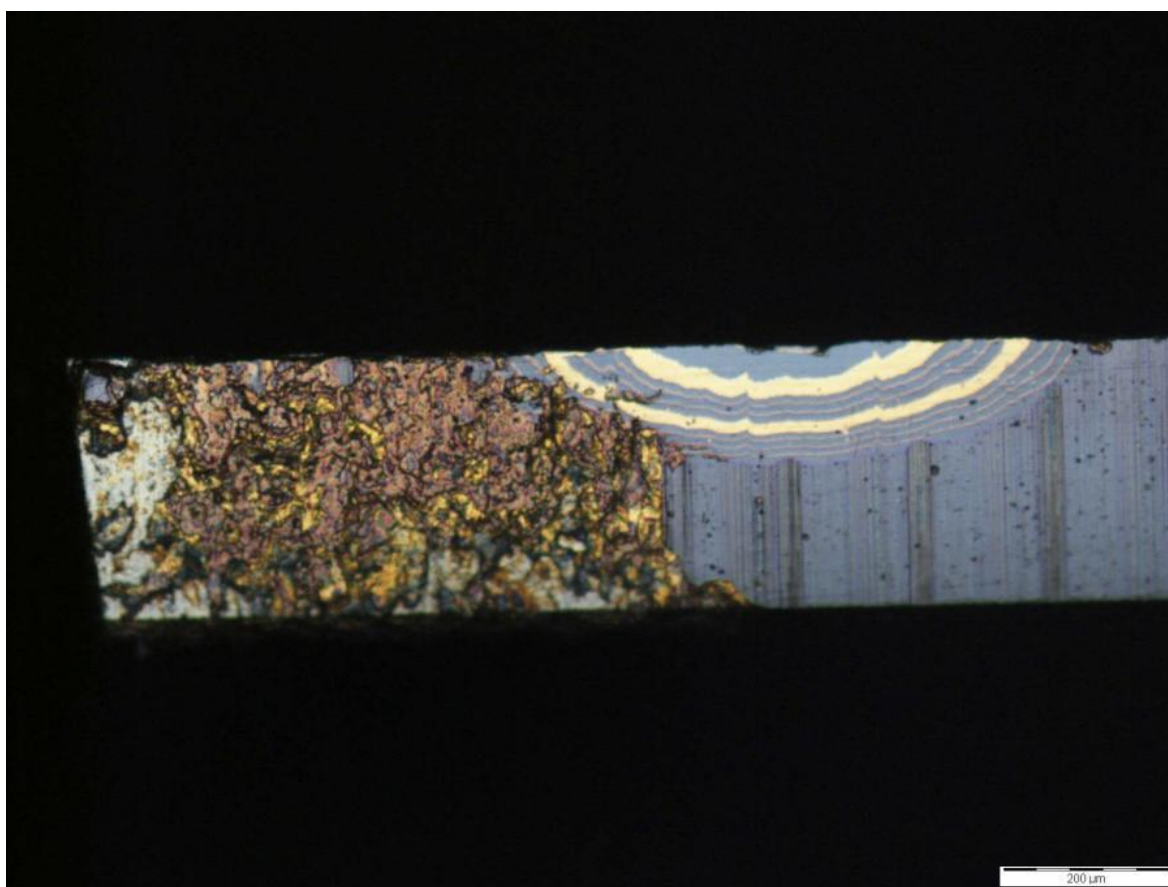
Stejně tak bylo provedeno srovnání úspor pro nástroje geometrie B, které je zobrazeno na obr. 27.



Obr. 27 Úspory při použití povlakovaných nástrojů geometrie B.

## 5 DISKUZE

Předmětem diskuze je odpovlakování nástroje (tzv. *stripping*) před opětovným nanesením povlaku. Při použití drahých nástrojů je snahou je zachránit, opakovaným použitím totiž odpadají náklady na výrobu nových nástrojů. Pokud je povlak porušen nebo je nutné nástroj přebrousit, je potřeba nástroj nejprve odpovlakovat. V případě, že by byla aplikována nová vrstva bez odstranění zbytků předchozího povlaku, zvyšovalo by se vnitřní napětí v nástroji a docházelo by ke zhoršení adheze s následkem odlupování nového povlaku z povrchu nástroje. Na obr. 28 lze pozorovat větší množství starých vrstev [33].



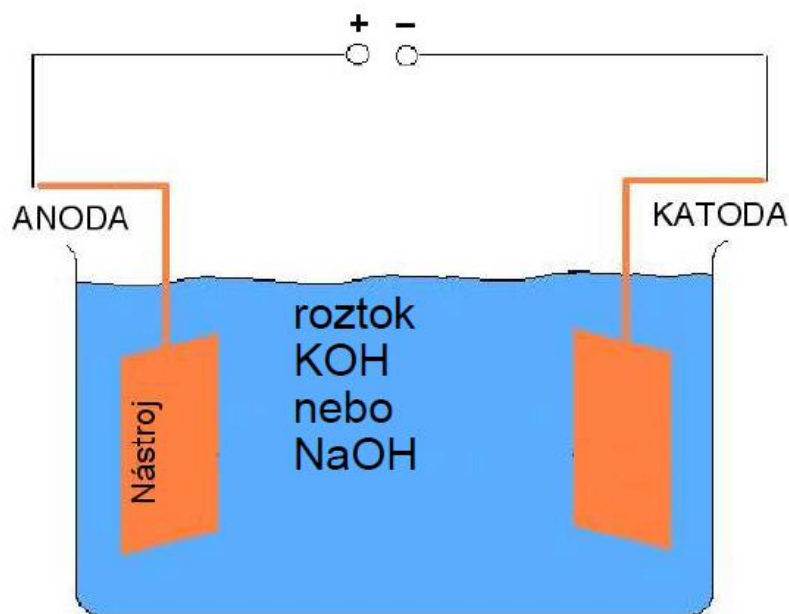
Obr. 28 Několik starých povlaků na nástroji [34].

### 5.1 Metody odpovlakování

Při mechanickém odstranění povlaků hrozí porušení povrchu nástroje abrazivními částicemi nebo nedostatečné odstranění povlaku u nástrojů se složitější geometrií. Jako výhodnější alternativa se jeví být chemické nebo elektrochemické metody odpovlakování [33].

Povlaky na bázi titanu lze odpovlakovat chemickou cestou. V tomto případě se používá peroxid vodíku jako oxidační činidlo spolu s komplexní látkou, což může být např. kyselina dinatrium ethylendiamintetraoctová ( $\text{Na}_2\text{EDTA}$ ) nebo kalium-natrium-tartrat-tetrahydrát ( $\text{C}_4\text{H}_4\text{KNaO}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ). Při odpovlakování ocelí nehrozí poškození substrátu a odstranění povlaku např. z HSS nástroje trvá přibližně 2–3 hodiny [35, 34].

K odstranění povlaků, které obsahují chrom, se používá *stripping* elektrochemický. Nástroj je připojen na anodu a spolu s katodou je vložen do elektrolytu (nejčastěji roztok KOH nebo NaOH). Následně je sestava napojena ke zdroji stejnosměrného proudu, čímž dochází k uvolňování iontů a rozpouštění povlaku. V podstatě je tedy elektrochemické odpovlakování opačný proces než galvanické pokovování. Schéma elektrochemického odpovlakování je na obr. 29 [35].



Obr. 29 Schéma elektrochemického odpovlakování [36].

## ZÁVĚR

Výsledky testování povlaků lze shrnout takto:

- Průměrná aritmetická úchylka profilu Ra se u čtyř různých povlaků pohybovala v rozmezí 0,01–0,33  $\mu\text{m}$ . Povlak č. 2 (nanokompozitní povlak na bázi AlTiN) vykazoval střední hodnotu Ra určenou ze čtyř míst měření 0,035  $\mu\text{m}$ . Pro orientaci – takové struktury povrchu je dosaženo některými dokončovacími metodami obrábění, jako jsou jemné lapování a superfinišování. Mezi strukturou povrchu povlaku a trvanlivostí nástroje s daným povlakem však v rámci této práce nebyla zjištěna souvislost.
- Ve všech případech počet pracovních cyklů při použití povlakovaného nástroje oproti nástroji bez povlaku vzrostl. V případě povlaku č. 3 (nanokompozitní povlak na bázi AlCrN) byl rozdíl největší, počet cyklů dosáhl na 2,8násobek (nárůst 180 %).
- U dvou povlaků byla vyhodnocena jejich ekonomická výhodnost, kdy se porovnávaly náklady za povlakované nástroje oproti nástrojům bez povlaku. Každý povlak byl aplikován na nástroje se dvěma různými geometriemi. Ve třech případech by se povlakování ekonomicky vyplatilo (úspory 8,69 %, 11,61 % a 30,18 %), v jednom případě byla vypočtena ekonomická ztráta 5,77 %.
- Dalšíh úspor by bylo možné dosáhnout opakovaným povlakováním nástrojů, které by se provádělo vždy po dosažení určitého opotřebení starého povlaku – kritériem pro dosažení tohoto stavu může být např. počet trhlin, délka nejdelší trhliny nebo průměrná délka trhlin.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění – 1. část* [online]. [cit. 2018-01-13]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
- [2] ZAHRADNÍK, Radek. *Tepelně-mechanická degradace povrchů za vysokých teplot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 236 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.
- [3] FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Nástrojové oceli (odborná kniha)*. 1. vyd. Brno: Dům techniky. 1994. 230 s.
- [4] MELLOULI, Dhouha, Nader HADDAR, Alain KÖSTER a Hassine FERID AYEDI. Hardness effect on thermal fatigue damage of hot-working tool steel. *Engineering Failure Analysis* [online]. Elsevier, 2014, (45), 85-95 [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630714001915>
- [5] *Oxidace a koroze* [online]. [cit. 2018-01-28]. Dostupné z: [www.zam.fme.vutbr.cz/~vlach/6ms/prednasky/koroze.doc](http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlach/6ms/prednasky/koroze.doc)
- [6] HRABINA, Martin. *Renovace nástrojových ocelí pro tváření za studena*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček.
- [7] RYCERZ, Pawel, Andrew OLVER a Amir KADIRIC. Propagation of surface initiated rolling contact fatigue cracks in bearing steel. *International Journal of Fatigue* [online]. Elsevier, 2017, (97), 29-38 [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014211231630411X>
- [8] ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s.: *Nitridace* [online]. [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.zps-fn.cz/nitridace/>
- [9] KOSEK, Lukáš. *Lomová houževnatost kovových materiálů a její zkoušení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [10] *Fraktografie – nauka o lomech* [online]. [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=3605&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3605&typ=html)
- [11] BÍLEK, Pavel a Mária FARKAŠOVÁ. *Křehký a tvárný lom, lineární a elastoplastická lomová mechanika* [online]. Žilinská univerzita, Strojnícka fakulta, Katedra materiálového inžinierstva [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2010/12/Křehký-a-tvárný-lom-BilekFarkasova.ppt>
- [12] ROHLOVÁ, Marie. *Příčiny porušení lisovacích kleští*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2015. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Elena Čižmarová, Ph.D.
- [13] FUSEK, Martin a Ludmila ADÁMKOVÁ. *Únava materiálu: Křehký lom, základní mechanické vlastnosti materiálu* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_011/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu/02%20Text%20pro%20e-learning/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu%2004.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_011/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu/02%20Text%20pro%20e-learning/%C3%9Anava%20materi%C3%A1lu%2004.pdf)

- [14] JANÍČEK, Přemysl, Pavel MÁCHAL, Jiří MAREK a Jan MAREČEK. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí* [online]. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2013 [cit. 2018-03-11]. ISBN 978-80-247-4127-7. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=13GmWt\\_Y7f8C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs\\_atb#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=13GmWt_Y7f8C&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false)
- [15] *Zkoušky odolnosti ocelí proti křehkému lomu, tranzitní teploty* [online]. [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: [www.zam.fme.vutbr.cz/~vlach/6ms/prednasky/Hou2.doc](http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlach/6ms/prednasky/Hou2.doc)
- [16] MICHALISKO, Jan. *Houževnatost kovových materiálů a její zkoušení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [17] VÁCLAVÍK, Martin. *Predikce teplotní závislosti lomové houževnatosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 99 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Válka, CSc.
- [18] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav a Petr HRABĚ. Teplotní závislost houževnatosti kovových materiálů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, (7), 57 [cit. 2018-03-27]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/teplotni-zavislost-houzevnatosti-kovovych-materialu.html>
- [19] RŮŽIČKA, Milan, Josef JURENKA a Zbyněk HRUBÝ. *Dynamická pevnost a životnost* [online]. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: [http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/DPZ\\_2014\\_Jur\\_pr1.pdf](http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/DPZ_2014_Jur_pr1.pdf)
- [20] OPLT, Tomáš. *Parametry lomové mechaniky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 34 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jana Horníková, Ph.D.
- [21] FAJT, Josef. *Pilsen Tools: Jak ovlivní výrobce životnost tvářecích nástrojů?* [online]. PILSEN TOOLS s.r.o., 2009 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2009/sbornik/Lists/Papers/100.pdf>
- [22] ČERNOBILA, Lubor. *Kovací teploty ocelí* [online]. Střední odborná škola Luhačovice, 2012 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2753914/>
- [23] SALABOVÁ, Petra. *Vliv kryogenního zpracování na vlastnosti ledeburitických nástrojových ocelí* [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12013/vliv-kryogenniho-zpracovani-na-vlastnosti-ledeburitickych-nastrojovych-oceli.html>
- [24] *Kryogenické zpracování* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://kryogenika.cz/kryogenicke-zpracovani/>
- [25] ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE a.s.: *Kryogenní zpracování* [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.zps-fn.cz/kryogenni-zpracovani/>
- [26] BITTNER, Jan. *Metody povlakování řezných nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [27] FLODR, Vojtěch. *Testování řezných nástrojů povlakovaných nanokrystalickými povlaky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 68 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Miroslav Piška, CSc.



- [28] *CemeCon s.r.o.: Technologie povlakování* [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://www.cemecon.cz/technologie-povlakovani>
- [29] FOLTÝN, Michal. *Povlakované slinuté karbidy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [30] LEIDORF, Michal. *Zápustkové kování náboje kola*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 78 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Štroner, Ph.D.
- [31] VESELÝ, Milan. *Zápustkové kování ozubeného kola*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Štroner, Ph.D.
- [32] *SHM, s.r.o.: Úpravy povrchů* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://shm-cz.cz/upravy-povrchu/>
- [33] NĚNIČKA, Jakub. *Odstraňování původních povlaků řezných nástrojů před novým povlakováním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 78 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [34] *CemeCon s.r.o.: Odpovlakování* [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <http://www.cemecon.cz/technologie-odpovlakovani>
- [35] HOMOLA, Tomáš. *Technologie odstranění tenkých vrstev Al*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2015. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Kudláček, Ph.D.
- [36] *Tenké vrstvy* [online]. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra materiálu a strojírenské metalurgie, Oddělení povrchového inženýrství [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_fel\\_2.pdf](https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel_2.pdf)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
<b>BCC</b>	<i>Body-centered cubic</i>
<b>CTOD</b>	<i>Crack tip opening displacement</i>
<b>CVD</b>	<i>Chemical vapour deposition</i>
<b>ČSN</b>	České státní normy
<b>EN</b>	Evropské normy
<b>EPLM</b>	Elasticko-plastická lomová mechanika
<b>FSI</b>	Fakulta strojního inženýrství
<b>HCP</b>	<i>Hexagonal close packed</i>
<b>HSS</b>	<i>High-speed steel</i>
<b>LELM</b>	Lineární elastická lomová mechanika
<b>PVD</b>	<i>Physical vapour deposition</i>
<b>VUT</b>	Vysoké učení technické

Symbol	Jednotka	Popis
<b>E</b>	[GPa]	Youngův modul pružnosti
<b>E'</b>	[GPa]	Efektivní Youngův modul pružnosti
<b>J<sub>C</sub></b>	[MPa·m]	Kritická hodnota J-integrálu
<b>J<sub>I</sub></b>	[MPa·m]	J-integrál pro mód zatěžování I
<b>K</b>	[MPa·√m]	Faktor intenzity napětí
<b>K<sub>I</sub></b>	[MPa·√m]	Faktor intenzity napětí pro mód zatěžování I
<b>K<sub>II</sub></b>	[MPa·√m]	Faktor intenzity napětí pro mód zatěžování II
<b>K<sub>III</sub></b>	[MPa·√m]	Faktor intenzity napětí pro mód zatěžování III
<b>K<sub>JC</sub></b>	[MPa·√m]	Lomová houževnatost určená z J <sub>C</sub>
<b>KU</b>	[J]	Nárazová práce pro zkušební tyč s U-vrubem
<b>KV</b>	[J]	Nárazová práce pro zkušební tyč s V-vrubem
<b>Ra</b>	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu

<b><math>R_e</math></b>	[MPa]	Mez kluzu v tahu
<b><math>R_m</math></b>	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
<b><math>Y</math></b>	[-]	Korekční funkce
<b><math>Z</math></b>	[%]	Kontrakce
<b><math>a</math></b>	[mm]	Délka trhliny
<b><math>\Delta a</math></b>	[mm]	Změna délky trhliny
<b><math>dU</math></b>	[J]	Změna potenciální energie
<b><math>\delta</math></b>	[mm]	Rozevření na čele trhliny
<b><math>\sigma_e</math></b>	[MPa]	Mez pružnosti
<b><math>\nu</math></b>	[-]	Poissonovo číslo
<b><math>\sigma_v</math></b>	[MPa]	Vztažné napětí